Н. И. БУЛГАКОВ

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Н. И. БУЛГАКОВ
кандидат технических наук

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

*Допущено Управлением учебными заведениями
Министерства электропромышленности СССР
в качестве учебного пособия
для электромеханических техникумов*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1950 ЛЕНИНГРАД

ЭЭ-4-2

В книге изложена теория расчета трансформатора и даны примеры практических расчетов. Кроме того, сделаны краткие описания конструкций основных деталей трансформатора, а также приведены справочные таблицы с рядом технических сведений, необходимых для расчета трансформаторов.

Книга предназначена для студентов электротехнических учебных заведений и для инженеров, работающих на электромашиностроительных заводах.

Редактор *И. В. Антик* Техн. редактор *Л. М. Фридкин*

Сдано в пр-во 21/III 1950 г. Подписано к печати 8/VI 1950 г.
Объем 19 печ. л. 23,5 уч.-изд. л. Знаков в 1 печ. л. 49 400 Формат 60×92[1]/16
Т-04337 Тираж 7 000 Заказ 95

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Силовые трансформаторы по ГОСТ-401-41 могут быть мощностью от 5 до 31 500 *ква*. Общее число различных значений номинальной мощности трансформаторов в указанных выше пределах по стандарту равно 26. Кроме того, для каждой мощности двухобмоточного трансформатора стандартом установлено 10—12 различных сочетаний напряжений и схем соединения обмоток. Для трехобмоточных трансформаторов разнообразие исполнений увеличивается еще из-за того, что по стандарту трехобмоточный трансформатор может иметь 4 различных сочетания мощностей обмоток, 2 различных сочетания напряжений короткого замыкания, а также могут быть некоторые различия в ответвлениях от обмоток.

Этот краткий перечень различных исполнений силовых трансформаторов позволяет судить о разнообразии конструктивных форм и технических данных трансформаторов.

Помимо силовых трансформаторов, известно большое число специальных типов трансформаторов, которые предназначаются для питания различных промышленных установок,— электрических печей, ртутных выпрямителей и т. п. Эти промышленные установки предъявляют ряд особых требований к трансформаторам, из-за чего последние отличаются от силовых трансформаторов как по техническим характеристикам, так и по конструктивному исполнению и по расчету.

Наконец, существует еще класс измерительных трансформаторов (трансформаторы тока, трансформаторы напряжения). Требования, предъявляемые к измерительным трансформаторам, заставляют производить расчет этих трансформаторов несколько иначе, чем силовых трансформаторов.

В данной книге разбираются вопросы расчета силовых трансформаторов для наиболее распространенных трехфазных трехстержневых и однофазных двухстержневых типов с круглыми катушками.

Ряд советских ученых успешно разрабатывал методы теоретического расчета силовых трансформаторов [Л. 6, 56, 57, 58, 59, 60, 61]. Используя работы этих советских ученых, автор данной книги расширил область теоретических расчетов таким образом, что ряд разрозненных методов теоретического рас-

чета удалось объединить между собой и найти новые решения. Одновременно наметились пути теоретического расчета многих типов специальных трансформаторов.

На основании этих работ автора в первой главе изложены различные способы определения основных размеров трансформатора. Сначала дается краткое изложение основ теории расчета и приводятся числовые примеры этих расчетов, далее указываются приближенные и упрощенные способы определения основных размеров трансформатора.

В следующих двух главах приведены описания основных частей трансформатора: остова и обмоток. Речь здесь идет о детализации конструкции остова и о способах размещения обмоток на этом остове. Следует иметь в виду, что детализация конструкции остова — очень трудоемкая работа, причем имеется весьма много возможностей найти решения, удовлетворяющие поставленным заданиям. В конечном итоге это задание сводится к тому, чтобы ток и потери холостого хода не превышали заданных значений при условии, что магнитная индукция не была бы выше заданного предельного значения. Этим условиям могут удовлетворить остовы с весьма разнообразными размерами и формами. Поэтому при практических расчетах, после того, как приближенно найдены основные размеры остова, переходят не к детализации его конструкции, а к размещению обмоток, т. е. к определению типа конструкции обмоток (глава 3), изоляции обмоток (глава 4), размещению обмоток в окне трансформатора (глава 3) и детальному подсчету технических данных обычно в той последовательности, которая указана в главе 5. В главе 6 даны примеры этих расчетов. Вполне естественно, что не всегда сразу получатся такие технические решения, которые соответствовали бы требованиям задания или стандарта. Поэтому иногда приходится по нескольку раз иначе размещать обмотки в окне, изменять сечения проводов и изменять размеры остова. Детальный расчет остова поэтому производится уже после того, как для обмотки получились вполне приемлемые результаты.

В конце книги приведен ряд справочных данных, которыми можно руководствоваться при расчетах.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность лауреату Сталинской премии профессору, доктору технических наук Г. Н. Петрову и главному конструктору Московского трансформаторного завода, лауреату Сталинской премии инженеру С. И. Рабиновичу за ценные указания при разработке теории расчета и отдельных вопросов практических расчетов. Кроме того, автор благодарит инженера М. М. Райского, вычислившего таблицы теоретического расчета.

Н. И. Булгаков

СОДЕРЖАНИЕ

Глава пятая

Расчет обмоток

Глава шестая

Примеры расчета

Расчетные записки

Приложения

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

1-1. ЗАДАНИЕ И ТИПЫ РАСЧЕТОВ

При расчете силового трансформатора должны быть заданы:

P — мощность трансформатора в *ква*;
φ — число фаз;
f — частота в *гц*;
U_1 и U_2 — первичное и вторичное напряжения в *в*; кроме того, задается схема соединения обмоток:
$u_к$ — напряжение короткого замыкания в %;
$P_{ст}$ — потери холостого хода (в основном — потери в стали);
$P_м$ — потери короткого замыкания (в основном потери в медных проводах);
i_0 — ток холостого хода в %;
способы охлаждения трансформатора;
режим нагрузки;
испытательные напряжения.

Вместе с тем требуется, чтобы температура обмотки и масла не превышала установленных стандартом значений. Вопросы возможности исполнения той или иной конструктивной формы остова, обмоток и других деталей решаются самим проектантом, но все же подразумевается известным определенный уровень производственных возможностей.

Поставленная таким образом задача по сути дела разделяется на две части. Первая часть задачи состоит в том, чтобы найти основные геометрические размеры остова заданного трансформатора и основные электромагнитные нагрузки — плотность тока и индукция в стали остова, а следовательно, и вес активных материалов. Вторая часть задачи заключается в размещении обмотки на найденном остове так, чтобы были удовлетворены все требования задания, а также все остальные условия стандартов. Кроме того, очевидно необходимо, чтобы обмотки были бы наиболее просты для производства.

С другой стороны, можно сказать, что по своему назначению расчеты можно разграничить на 3 типа — теоретический, заводский и учебный.

Теоретический расчет ограничивается лишь решением первой части задачи расчета, иначе называемой «геометрией трансформатора». Решение этой задачи ищется обычно, как минимальное значение функции многих переменных, т. е. ищется решение задачи о наименьшей стоимости трансформатора, удовлетворяющего указанным выше условиям. Теоретический расчет, как показывает само название, имеет прежде всего значение, как дополнительная глава к теоретической электротехнике, касающаяся проектирования электрических машин вообще. Практически теоретические расчеты очень удобны при решениях технико-экономических задач, имеющих общеотраслевое значение, например, когда решается вопрос о выборе тех или иных норм на потери в стали и в меди трансформаторов при разработке новых стандартов, при оценке возможности замены одного материала другим, или, например, при оценке преимуществ и недостатков при переходе с 50 *гц* на другие частоты и в других подобных задачах. В заводской практике теоретический расчет имеет значение лишь для получения некоторого общего уровня, по отношению к которому можно оценивать все варианты расчетов.

Заводский расчет сам по себе можно подразделить на проектирование новых серий и на пересчеты заданных моделей серии на различные новые сочетания напряжений, схем или на пересчеты из-за других каких-либо особых требований. Эти пересчеты представляют собой, так сказать, обыденную работу по расчету. Хорошее знание особенностей производства того или иного завода является непременным условием для правильного решения задач этих пересчетов.

При проектировании новых серий первая задача о «геометрии трансформатора» решается путем сопоставления ряда вариантов, при расчете которых используется весь опыт расчета предшествующих серий. Вторая часть задачи расчета решается лишь в общих чертах для того, чтобы выяснить, насколько тот или иной вариант удовлетворяет требованиям производства, определяемым наличием станков, приспособлений, штампов, оправок, пропиточных котлов, сушильных камер и тому подобных условий. Вместе с тем при решении первой задачи обращается внимание на то, чтобы каждый вариант расчета удовлетворял условию возможности размещения на одной и той же модели остова нескольких сочетаний напряжений или, наоборот, чтобы для разных значений напряжений при одной и той же мощности были предложены варианты расчета с разными размерами остова. При проекти-

ровании новых серий используются данные предыдущих серий. Анализ этих данных приводит к тому, что при заводском расчете отдельных моделей серии уже заранее бывает более или менее известна область изменений геометрических размеров, внутри которой будет находиться искомое решение. Путем постепенного изменения основных размеров производят подгонку каждого варианта под всю совокупность производственных и технико-экономических требований. Окончательное подробное размещение обмоток производится лишь для выбранных вариантов или для почти равноценных вариантов с тем, чтобы детали размещения дали новые данные для оценки сравниваемых вариантов.

Основная цель учебного расчета заключается в том, чтобы учащийся получил навыки правильного выбора конструктивных форм отдельных частей трансформатора, удовлетворяющих основным заданным техническим требованиям и освоил способы расчета всех технических данных трансформатора.

Для учебного расчета важны не столько математические операции вычисления размеров трансформаторов, сколько выяснение взаимной связи полученных геометрических форм, принятых электромагнитных и тепловых нагрузок и необходимых производственных условий с заданными техническими параметрами. Исходя из этих соображений, очень часто для решения первой задачи учебного расчета используются не теоретические решения, а разные полуэмпирические формулы, которые дают возможность сразу найти такие основные размеры трансформатора, при которых наиболее вероятно удовлетворилось бы наибольшее число заданных технических параметров. Эти полуэмпирические формулы получаются путем сопоставления данных ряда выполненных серий, на основании чего вычисляются те или иные коэффициенты или отношения различных величин. При помощи этих коэффициентов или отношений упрощаются теоретические формулы, которые в таком виде используются для решения первой части теоретического расчета. Способ вывода этих формул показывает, что они пригодны лишь для той области вариантов моделей, которая была обработана для вывода этих формул.

Но и в случае применения этих полуэмпирических формул или в случае использования иных каких-либо способов упрощенного и приближенного определения основных размеров остова трансформатора всегда приходится считаться с тем, что нельзя сразу найти такое размещение обмоток, которое полностью удовлетворило бы всем требованиям. Чаще всего размещение обмоток приходится несколько раз переделывать и даже подправлять основные размеры остова, пока не будет получен вариант расчета, удовлетворяющий как всем требова-

ниям задания, так и условиям производства. Эта подгонка расчета является наиболее трудоемкой частью работы. В сущности говоря, это есть третья часть расчета, когда видно, что все основные параметры получились более или менее удовлетворяющими требованиям задания, но все же кое-что требуется подправить. Чрезвычайно трудно дать общие правила, как найти такой путь изменения расчета, который легче всего привел бы к искомому решению. Обычно в качестве примеров в руководстве по расчету приводится окончательный результат этих исканий, где все результаты достаточно пригнаны друг к другу. В данной работе автор позволил себе дать пример рассуждений, которыми можно руководствоваться при подгонке расчета.

Изложенные соображения относительно ограниченного значения геометрии трансформатора для учебного расчета заставили автора сократить изложение теории расчета. Эта теория расчета заканчивается изложением приближенных способов определения основных размеров трансформатора. Постепенное упрощение этих приближенных способов определения основных размеров трансформатора приводит в конечном итоге к ряду характеристических кривых, по которым сразу можно приближенно найти основные размеры трансформатора для стандартизованных типов трансформаторов.

1-2. КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕОРИИ РАСЧЕТА

Геометрические формы трансформатора весьма просты. Поэтому по вопросу теоретического расчета было написано большое число работ, т. е. предложено много способов теоретического расчета. Основной недостаток всех этих работ — отсутствие математического анализа предлагаемого решения, т. е. не решается вопрос, есть ли данное решение единственное или возможны другие решения или другие подобные способы решения, а также не указывается, какая существует связь или взаимная зависимость разных методов решения.

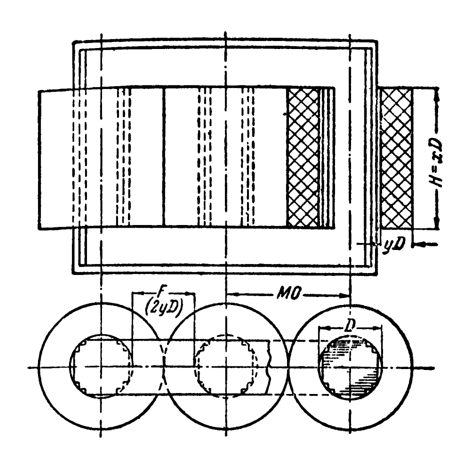
Эта оторванность друг от друга отдельных ранее предложенных способов решения побудила автора разработать такое решение, которое было бы, с одной стороны, общим для достаточно большого числа способов решения,а с другой стороны, позволяло бы строить новые способы решения, если бы в этом встретилась необходимость.

Кратко эта теория расчета может быть изложена следующим образом.

Вес активного материала, меди и стали трансформатора стержневого типа с круглыми катушками *может быть выражен, как функция трех независимых геометрических размеров.*

Пусть D обозначает диаметр стержня, H — его высоту, F — ширину окна магнитопровода трансформатора (в *см*)

(фиг. 1-1). Пусть нам даны оба коэффициента заполнения $\sigma_{ст}$ и $\sigma_{м}$. Коэффициент заполнения сечения сердечника $\sigma_{ст}$ выражает отношение активного сечения сердечника к площади окружности, описанной около сердечника. Коэффициент заполнения окна $\sigma_{м}$ выражает отношение площади сечения проводников в окне ко всей площади окна.



Фиг. 1-1. Теоретический рисунок остова трансформатора с обмоткой.

Введем обозначения

$$\left.\begin{aligned} H &= xD, \\ F &= yD. \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}1)$$

Тогда, если φ — число обмотанных сердечников, то вес материала проводов обмотки будет равен

$$G_{м} = \varphi\pi\gamma_{м}\sigma_{м}xy(y+1)D^3\cdot 10^{-3}\ [кг], \qquad (1\text{-}2)$$

где $\gamma_{м}$ — удельный вес (для меди $\gamma_{м}=8{,}9$ *кг/дм³*, а для алюминия $\gamma_{м}=2{,}7$ *кг/дм³*). Диаметр D выражен в сантиметрах. Вес стали для магнитопровода, у которого активное сечение ярма равно активному сечению стержней, выразится формулой

$$G_{ст} = \frac{\pi}{4}\gamma_{ст}\,\delta_{ст}(hx+by+d)D^3\cdot 10^{-3}\ [кг]. \qquad (1\text{-}3)$$

Здесь $\gamma_{ст}$ — удельный вес трансформаторной стали, равный 7,55 *кг/дм³*, а коэффициенты h, b, d зависят от числа стержней (табл. 1-1), причем последний коэффициент d учитывает вес стали в углах магнитопровода.

Таблица 1-1

Тип трансформатора	φ число стержней	Значения коэффициентов h	b	d
Однофазный	2	2	4	3,6
Трехфазный	3	3	8	5,6

Обозначим через $c_м$ и $c_{ст}$ стоимости 1 *кг* активных материалов в изделии. Тогда стоимость C активных материалов выразится формулой

$$C = [c_м \varphi \pi \gamma_м \sigma_м xy(y+1) + c_{ст} \frac{\pi}{4} \gamma_{ст} \sigma_{ст} (hx + by + d)] D^3 \cdot 10^{-3} \quad (1\text{-}4)$$

или сокращенно

$$C = \Phi(D, x, y). \quad (1\text{-}5)$$

Стоимость C, как функция трех переменных D, x, y, не может иметь минимума в области действительных значений D, x, y, в чем легко убедиться, взяв производные от C по каждой из переменной. Кроме того, формула (1-4) имеет тривиальное решение $C = 0$ при $D = 0$, т. е. стоимость равна нулю, когда размеры трансформатора равны нулю. Таким образом, формула (1-4) без каких-либо ограничений недостаточна для нахождения размеров трансформатора минимальной стоимости.

Такой вывод получился потому, что не были поставлены условия, что данный аппарат, занимающий какое-то пространство (D, x, y), должен „обладать“: мощностью P, потерями в меди $P_м$, в стали $P_{ст}$, плотностью тока δ, индукцией B, напряжением рассеяния U_p, током холостого хода I_0, удельной тепловой нагрузкой обмоток $q_м$, удельной тепловой нагрузкой остова $q_{ст}$ и т. д.

Этот перечень технических параметров показывает, что на формулу (1-5) можно наложить большое число разнообразных зависимостей. Для этого надо составить уравнения, связывающие размеры трансформатора D, x, y с тем или иным числом технических параметров. Значения этих технических параметров надо считать заданными, как „физические ограничения“ для геометрического пространства и, следовательно, переменными величинами будут D, x, y.

Наиболее просто эти „физические ограничения“ могут быть получены из формулы для мощности трансформатора.

Формула мощности трансформатора имеет вид

$$P = 4{,}44\, \varphi f Q I B n \cdot 10^{-11}, \quad (1\text{-}6)$$

где P — мощность в *ква*;
f — частота в *гц*;
φ — число обмотанных сердечников [см. формулу (1-2) и табл. 1-1];
Q — активное сечение сердечника в *см*^{2};
I — ток в *а*;
B — индукция в *гс*;
n — число витков.

При помощи простых зависимостей

$$I=\frac{1}{2}xy\sigma_{м}\delta D^2\cdot 10^2, \quad (1\text{-}7)$$

$$Q=0{,}785\sigma_{ст}D^2, \quad (1\text{-}8)$$

где δ — плотность тока в $а/мм^2$, а $\sigma_м$ и $\sigma_{ст}$ — коэффициенты заполнения окна и сечения стержня, формула (1-6) примет вид

$$P=2{,}22\cdot 0{,}785\,\varphi f\sigma_{м}\sigma_{ст}\delta BxyD^4\cdot 10^{-9}. \quad (1\text{-}9)$$

Если мы будем считать, что плотность тока δ и индукция B нам заданы, то мощность трансформатора по уравнению (1-9) будет функцией трех переменных D, x, y.

Если теперь искать минимум стоимости C данной формулой (1-5), т. е. зависящей от переменных D, x, y, но считать, что переменные D, x, y связаны между собой дополнительной зависимостью (1-9), то легко получить вполне определенное решение этой задачи на минимум стоимости. Но этот способ не есть единственный для решения задачи на минимум стоимости, если на формулу (1-5) наложено „физическое ограничение“ в виде формулы (1-6) для мощности P.

Формулу (1-9) можно преобразовать еще несколько раз, вводя новые технические параметры. Если мы введем $P_м$ потери в медных проводах в *вт* и $P_{ст}$ — потери в стали остова в *вт*, то

$$P_м=\alpha_м\delta^2G_м, \quad (1\text{-}10)$$

$$P_{ст}=\alpha_{ст}\beta^2G_{ст}, \quad (1\text{-}11)$$

где $G_м$ и $G_{ст}$ — веса медных проводов и стали остова в *кг* [см. (1-2) и (1-3)]; δ — плотность тока в $а/мм^2$, а вместо индукции B подставлено β, где

$$\beta=\frac{B}{10\,000},$$

и наконец $\alpha_м$ и $\alpha_{ст}$ — удельные потери на 1 *кг*. Для медных проводов при температуре 75°С удельные потери на 1 *кг* медного провода равны

$$\alpha_м=\frac{\rho}{\gamma}[1+a(t-20)]\cdot 10^3=\frac{0{,}0175}{8{,}9}(1+0{,}00395\cdot 55)\cdot 10^3=$$
$$=2{,}4\ вт/кг.$$

Удельные потери в стали $\alpha_{ст}$ определяются по таблицам, составленным на основании испытаний образцов стали или ряда изготовленных остовов.

Заменяя в (1-9) δ и B через $P_м$ и $P_{ст}$ из (1-10) и (1-11) порознь или одновременно, можно получить 4 формулы, дающие зависимости мощности P от δ и B (1·9) или от $P_м$ и $P_{ст}$, или от δ и $P_{ст}$, или от $P_м$ и B, т. е. получить 4 различных „физических ограничения“ и, следовательно, 4 различных решения задачи о минимальной стоимости C, в зависимости от того, какие два технические параметра из четырех параметров δ, B, $P_м$ и $P_{ст}$ являются заданными.

Так же как для указанного ранее случая решения задачи о минимуме функции C по (1-5) совместно с ограничением по (1-9), во всех этих четырех случаях речь идет об определении трех переменных величин D, x, y. Поэтому можно считать, что решение уже найдено, если после всех математических операций и преобразований получится для каждого случая 3 уравнения с тремя неизвестными D, x, y.

Вычисление показывает, что одно из этих трех уравнений будет общим для всех четырех случаев и будет давать зависимость только между x и y

$$x = \frac{y(4by + b + 3d)}{h(2y + 1)}. \qquad (1\text{-}12)$$

Если ввести параметр m, определяемый по формуле

$$m = \frac{c_м \gamma_м \sigma_м}{c_{ст} \gamma_{ст} \sigma_{ст}}, \qquad (1\text{-}13)$$

то два других уравнения имеют вид для случая, когда заданы δ и B

$$4\varphi m = \frac{3by + 3d - hx}{xy(y + 1)}, \qquad (1\text{-}14)$$

$$\varphi xyD^4 = \frac{11{,}5P \cdot 10^2}{\sigma_м \sigma_{ст} \delta\beta} = Q_0 \qquad (1\text{-}15)$$

или когда заданы потери $P_м$ и $P_{ст}$

$$4\varphi m = \frac{(hx + by + d)(3by + 3d - 2hx)}{xy(y + 1)(2hx - by - d)}, \qquad (1\text{-}16)$$

$$\sqrt{\frac{\varphi xy}{(y + 1)(hx + by + d)}}\, D = \frac{14{,}7P}{\sqrt{P_м P_{ст}}} \sqrt{\frac{\alpha_м \alpha_{ст}}{\sigma_м \sigma_{ст}}} = L_0, \qquad (1\text{-}17)$$

в третьем случае, когда заданы δ и $P_{ст}$

$$4\varphi m = \frac{2(hx + by + d)(3by + 3d - hx)}{xy(y + 1)(2hx - by - d)}, \qquad (1\text{-}18)$$

$$\frac{\varphi xyD^{5/2}}{\sqrt{hx + by + d}} = \frac{10^2}{3{,}11} \frac{P}{\delta\sqrt{P_{ст}}} \frac{\sqrt{\alpha_{ст}\gamma_{ст}}}{\sigma_м \sqrt{\sigma_{ст}}} = M_1. \qquad (1\text{-}19)$$

Наконец, когда заданы β и $P_м$

$$4\varphi m = \frac{3by + 3d - 2hx}{2xy(y+1)}, \qquad (1\text{-}20)$$

$$\sqrt{\frac{\varphi xy}{y+1}} D^{5/2} = \frac{10^2}{1,555} \frac{P}{\beta \sqrt{P_м}} \frac{\sqrt{a_м \gamma_м}}{c_{ст} \sqrt{c_м}} = M_2. \qquad (1\text{-}21)$$

В формулах (1-15), (1-17) и (1-19), (1-21) все постоянные (заданные) величины собраны в правой части равенства, которые условно обозначены через Q_0, L_0, M_1 и M_2.

Так как дальнейшие исключения переменных в этих четырех системах уравнений привели бы к уравнениям с высокими степенями неизвестных, то для вычислений удобнее составить кривые (см. приложение II лист 3), где переменные даны в функции от параметра m [уравнение (1-13)].

Для разбираемых четырех случаев, именуемых в дальнейшем абсолютными минимумами, всегда заданы значения двух величин из четырех величин δ, B, $P_м$ и $P_{ст}$ — две других величины найдутся по (1-10) и (1-11), но эти 4 решения будут совершенно независимы друг от друга и будут давать различные значения для D, x, y.

Так, например, пусть заданы δ и B. После решения задачи на минимум функции по (1-12), (1-14) и (1-15) найдутся значения D, x и y и, следовательно, вес медных проводов $G_м$ по (1-2) и вес стали $G_{ст}$ по (1-3). Тогда по (1-10) и (1-11) можно найти потери $P_м$ и $P_{ст}$. Если теперь по (1-12), (1-16) и 1-17) найти значения D, x и y для случая, когда заданы найденные значения потерь $P_м$ и $P_{ст}$, то новые значения D, x и y получатся отличными от найденных ранее значений D, x, y. Подобным же образом можно убедиться, что для всех четырех случаев будут получаться различные значения D, x и y. Только в одном единственном случае возможно совпадение двух абсолютных минимумов.

Для заданных δ и B и для заданных $P_м$ и $P_{ст}$ это совпадение получается, когда

$$m = 0,8124, \ x = 2,8808, \ y = 0,4303,$$

т. е. при соответствующем подборе постоянных Q_0 и L_0 по формулам (1-15) и (1-17).

В заданиях по расчету чаще всего требуется, чтобы трансформатор имел бы заданные потери $P_м$ и $P_{ст}$. Формула (1-17) показывает, что для оценки стоимости трансформатора существенное значение имеет произведение $P_м$ и $P_{ст}$, а не сумма потерь $P_м$ и $P_{ст}$. Поэтому, если сравниваются два ра-

счета с одинаковыми заданными к. п. д. и коэффициентами заполнения $\sigma_м$ и $\sigma_{ст}$, то дороже будет тот трансформатор, у которого по расчету меньше произведение потерь. По формуле (1-17) можно сразу оценить, насколько один трансформатор должен быть дороже другого.

1-3. ХОД РАСЧЕТА И ПРИМЕРЫ

Как было указано выше, основные размеры остова могут быть определены либо путем теоретического расчета, либо приближенным образом (см. далее). Для указанных выше четырех случаев абсолютных минимумов стоимости ход теоретического расчета совершенно одинаков и поэтому в данном случае этот ход расчета будет дан применительно к тому абсолютному минимуму, когда заданы потери $P_м$ и $P_{ст}$. По формуле (1-13) определяется параметр m

$$m = \frac{c_м \gamma_м \sigma_м}{c_{ст} \gamma_{ст} \sigma_{ст}}.$$

Отношение стоимостей $\frac{c_м}{c_{ст}}$ при 1 *кг* медных проводов и 1 *кг* стали в изделии колеблется от 3 до 3,5.

Удельные веса берутся равными для меди $\gamma_м = 8{,}9$ *кг/дм*^{3}, для алюминия $\gamma_а = 2{,}7$ *кг/дм*^{3}, для легированной стали $\gamma_{ст} = 7{,}55$ *кг/дм*^{3}.

Коэффициент $\sigma_{ст}$ заполнения сечения стержня весьма мало изменяется в пределах от 0,73 до 0,79 и в теоретических расчетах обычно берется равным 0,75.

Коэффициент $\sigma_м$ заполнения окна трансформатора изменяется в зависимости от мощности трансформатора, значения высшего напряжения обмоток и от типа конструкции обмоток. Приближенные значения $\sigma_м$ даны в приложении I (лист 1).

Когда найдено m, то по таблицам приложения II листы 1 и 2 или по кривым листа 4 того же приложения находятся значения x и y. Эта таблица получена путем решения уравнений (1-12) и (1-16).

Далее следует найти D по (1-17). Для этого надо сначала найти L_0—правую часть от (1-17). Как указано выше, коэффициент потерь $\alpha_м$ в 1 *кг* медного провода следует брать равным 2,4 и для трансформаторной стали толщиной 0,35 *мм* можно в первом приближении считать $\alpha_{ст} = 1{,}4$.

При этом значении $\alpha_{ст}$ кривая удельных потерь при обычно применяемых индукциях 13 000 ÷ 15 000 *гс* может достаточно хорошо выражена дугой параболы

$$\alpha_{ст} = 1{,}4\beta^2, \qquad (1\text{-}22)$$

где $\alpha_{ст}$—потери в 1 *кг* стали при индукции $B=10000$ *гс*. Вместо вычислений диаметра стержня D по (1-17) можно пользоваться кривой приложения II (лист 4).

Тогда по формуле (1-1) находятся высота H остова и F— ширина окна. Расстояние между осями MO стержня, очевидно, равно

$$MO=D+F.$$

Наконец, по кривым приложения II (лист 7) находятся как функции y, вспомогательные величины $f_м$ и $f_{ст}$, равные

$$f_м=xy(y+1), \qquad (1\text{-}23)$$

$$f_{ст}=hx+by+d. \qquad (1\text{-}24)$$

Эти величины входят, как множители в формулы (1-2) и (1-3) для $G_м$—веса провода и $G_{ст}$—веса стали. Эти формулы примут теперь следующий вид (для трехфазных трансформаторов с медным проводом):

$$G_м=83{,}9\sigma_м f_м D^3\cdot 10^{-3}\ (кг), \qquad (1\text{-}25)$$

$$G_{ст}=5{,}93\sigma_{ст} f_{ст} D^3\cdot 10^{-3}\ (кг). \qquad (1\text{-}26)$$

В заключение остается найти те два параметра, которые не были заданы в начале расчета—плотность тока δ и индукцию B. Для этого приходится пользоваться формулами (1-10) и (1-11)

$$P_м=a_м\delta^2 G_м,$$

$$P_{ст}=a_{ст}\beta^2 G_{ст}.$$

На этом теоретический расчет основных размеров трансформатора может закончиться, если анализ полученных результатов не потребует дополнительных вычислений. Так как приведенный выше теоретический расчет требует весьма мало времени, то обычно дополнительные просчеты вариантов могут дать ряд ценных указаний.

В табл. 1-2 приведены результаты четырех примеров расчета. В верхней части этой таблицы указаны заданные исходные данные — мощности P в *ква*, напряжения и потери $P_м$ и $P_{ст}$. Последние взяты по ГОСТ 401-41. Однако, для расчета взяты несколько меньшие значения потерь в меди $P_м$, а именно 95% от значений по стандарту. Эта поправка учитывает ориентировочно необходимость увеличить вес меди для регулировочных витков (+5%) в обмотке высшего напряжения, а также неизбежные добавочные потери от вихревых токов (главным образом, в обмотке низшего напряжения). Во всем же теоретическом расчете потери в меди учитываются только, как

$$P_a=I^2R.$$

P, *ква*	10	100
U_1/U_2, *в*	3 000 ± 5%/230	6 000 ± 5%/230
Схема и группа соединений	$Y/Y_0 - 12$	$Y/Y_0 - 12$
Потери: ГОСТ-401-41	$P_{\text{м}} = 335$ *вт*; $P_{\text{ст}} = 100$ *вт*	$P_{\text{м}} = 2\,400$ *вт*; $P_{\text{ст}} = 600$ *вт*
Потери: Расчет	$P_{\text{м}} = 318$ *вт*; $P_{\text{ст}} = 100$ *вт*	$P_{\text{м}} = 2\,280$ *вт*; $P_{\text{ст}} = 600$ *вт*
Коэффициенты потерь	$\alpha_{\text{м}} = 2{,}4$; $\alpha_{\text{ст}} = 1{,}4$;	$\alpha_{\text{м}} = 2{,}4$; $\alpha_{\text{ст}} = 1{,}4$
Коэффициенты заполнения	$\sigma_{\text{т}} = 0{,}2$; $\sigma_{\text{ст}} = 0{,}75$	$\sigma_{\text{м}} = 0{,}26$; $\sigma_{\text{ст}} = 0{,}75$
$m = 3.5\frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{ст}}}\frac{\sigma_{\text{м}}}{\sigma_{\text{ст}}}$	$m = 3{,}5\frac{8{,}9}{7{,}55}\cdot\frac{0{,}2}{0{,}75} = 1{,}1$;	$m = 3{,}5\frac{8{,}9}{7{,}55}\cdot\frac{0{,}26}{0{,}75} = 1{,}43$
$L_0 = \frac{14{,}7\,P}{\sqrt{P_{\text{м}}P_{\text{ст}}}}\sqrt{\frac{\alpha_{\text{м}}\,\alpha_{\text{ст}}}{\sigma_{\text{м}}\,\sigma_{\text{ст}}}}$	$L_0 = \frac{14{,}7\cdot 10}{\sqrt{318\cdot 100}} \times \sqrt{\frac{2{,}4\cdot 1{,}4}{0{,}2\cdot 0{,}75}} = 3{,}9$ *см*	$L_0 = \frac{14{,}7\cdot 100}{\sqrt{2\,280\cdot 600}} \times \sqrt{\frac{2{,}4\cdot 1{,}4}{0{,}26\cdot 0{,}75}} = 5{,}21$ *см*
x; y	$x = 2{,}79$; $y = 0{,}4$	$x = 2{,}59$; $y = 0{,}37$
D/L_0	2,68;	2,79
D	$D = 10{,}45$ *см* ≈ 105 *мм*;	$D = 14{,}5$ *см* = 145 *мм*
H; F; MO, *мм*	$H = 292$; $F = 84$; $MO = 189$;	$H = 376$; $F = 108$; $MO = 253$
D^3; *см*^{3}	$1{,}141\cdot 10^3$	$3{,}05\cdot 10^3$
$f_{\text{м}}$; $f_{\text{ст}}$	$f_{\text{м}} = 1{,}56$; $f_{\text{ст}} = 17{,}2$	$f_{\text{м}} = 1{,}32$; $f_{\text{ст}} = 16{,}4$
$G_{\text{м}}$; $G_{\text{ст}}$, *кг*	$G_{\text{м}} = 29{,}8$; $G_{\text{ст}} = 87{,}2$	$G_{\text{м}} = 87{,}7$; $G_{\text{ст}} = 222$
δ, B	$\delta = 2{,}11$ *а/мм*^{2}; $B = 9\,050$ *гс*	$\delta = 3{,}29$ *а/мм*^{2}; $B = 13\,900$ *гс*

Таблица 1-2

P, *ква*	1 800	15 000 [100—100—67%]
U_1/U_2, *в*	35 000 ± 5%/6 300	110/38,5/11
Схема и группа соединений	$Y/D-11$	$Y_0/Y_0/D-12-11$
Потери: ГОСТ-401-41	$P_м = 24$ *квт*; $P_{ст} = 8,3$ *квт*	$P_м = 132$ *квт*; $P_{ст} = 59$ *квт*
Потери: Расчет	$P_м = 22,8$ *квт*; $P_{ст} = 8,3$ *квт*	$P_м = 125,5$ *квт*; $P_{ст} = 59$ *квт*
Коэффициенты потерь	$\alpha_м = 2,4$; $\alpha_{ст} = 1,4$	$\alpha_м = 2,4$; $\alpha_{ст} = 1,4$
Коэффициенты заполнения	$\sigma_м = 0,150$; $\sigma_{ст} = 0,75$	$\sigma_м = 0,1$; $\sigma_{ст} = 0,75$
$m = 3,5 \frac{\gamma_м}{\gamma_{ст}} \frac{\sigma_м}{\sigma_{ст}}$	$m = 3,5 \frac{8,9}{7,55} \cdot \frac{0,150}{0,75} = 0,828$	$m = 3,5 \frac{8,9}{7,55} \cdot \frac{0,1}{0,75} = 0,55$
$L_0 = \frac{14,7P}{\sqrt{P_м P_{ст}}} \sqrt{\frac{\alpha_м \alpha_{ст}}{\sigma_м \sigma_{ст}}}$	$L_0 = \frac{14,7 \cdot 1\,800}{\sqrt{22\,800 \cdot 8\,300}} \times \sqrt{\frac{2,4 \cdot 1,4}{0,150 \cdot 0,75}} = 10,55$ *см*	$L_0 = \sqrt{1,33}\, \frac{14,7 \cdot 15\,000 \cdot 10^3}{\sqrt{125,5 \cdot 59}} \times \sqrt{\frac{2,4 \cdot 1,4}{0,1 \cdot 0,75}} = 19,8$ *см*
x; y	$x = 3,00$; $y = 0,437$	$x = 3,33$; $y = 0,49$
D/L_0	2,57	2,43
D	$D = 27,1$ *см* $= 271$ *мм*	$D = 48,1$ *см* $= 481$ *мм*
H; F; MO, *мм*	$H = 814$; $F = 237$; $MO = 508$	$H = 1\,600$; $F = 472$; $MO = 953$
D^3; *см*^{3}	$19,9 \cdot 10^3$	$111 \cdot 10^3$
$f_м$; $f_{ст}$	$f_м = 1,90$; $f_{ст} = 18,2$	$f_м = 2,44$; $f_{ст} = 19,55$
$G_м$; $G_{ст}$, *кг*	$G_м = 476$; $G_{ст} = 1\,610$	$G_м = 2\,280$; $G_{ст} = 9\,660$
δ, B	$\delta = 4,47$ *а/мм*^{2}; $B = 19\,200$ *гс*	$\delta = 4,8$ *а/мм*^{2}; $B = 20\,900$ *гс*

Во второй части табл. 1-2 указаны значения различных коэффициентов и параметров. Относительно коэффициентов $\alpha_м$, $\alpha_{ст}$, $\sigma_м$, $\sigma_{ст}$ и параметра m указания даны в начале этой главы. Так как здесь во всех четырех расчетах заданы потери $P_м$ и $P_{ст}$, то подсчитывается постоянная L_0 по формуле (1-17).

В третьей части указаны значения x, y и D, взятые по кривым приложения II (лист 4), а далее остальные геометрические размеры остова.

Наконец, по кривым приложения II (лист 7) найдены $f_м$, $f_{ст}$, а по формулам (1-2) и (1-3) — веса $G_м$, $G_{ст}$. Последние вычисления дают значения для плотности тока δ в *а/мм²* и индукции B в *гс*.

Сравнивая полученные результаты, легко видеть, что для трансформаторов 1 800 и 15 000 *ква* получились неприемлемые значения индукций. Наиболее естественным выходом было бы изменить значения потерь, но это недопустимо, ибо они заданы стандартом. Тем не менее нельзя допустить индукцию B более 14 500 — 15 000 *гс*, ибо при повышенных индукциях чрезмерно возрастает значение реактивной мощности для намагничения трансформатора. Таким образом, возникает новая задача теоретического расчета, когда заданы не 2, а 3 технических параметра

$$P_м,\ P_{ст},\ B.$$

Этот случай является частным экстремумом, который решается в следующем параграфе.

Для трансформатора 10 *ква* получилась пониженная индукция. В области таких индукций $\alpha'_{ст}$ имеет уже значение 1,3. Легко получится следующий вариант расчета. Новое значение L_0 будет равно

$$L'_0 = L_0 \sqrt{\frac{\alpha'_{ст}}{\alpha_{ст}}} = 3{,}9 \sqrt{\frac{1{,}3}{1{,}4}} = 3{,}77 \text{ см}.$$

Так как m не изменилось, то x и y останутся прежними. Зато новое значение D' будет равно

$$D' = \frac{D}{L_0} L'_0 = 2{,}68 \cdot 3{,}77 = 10{,}05 \text{ см} = 101 \text{ мм}$$

и потому

$$H' = H \frac{L'_0}{L_0} = 292 \frac{3{,}77}{3{,}9} = 282 \text{ мм};\ F = 81{,}3 \text{ мм};\ MO = 182{,}5.$$

Коэффициенты $f_м$ и $f_{ст}$ не изменятся, так как они зависят только от y. Следовательно, вес стали уменьшится до

$$87{,}2 \left(\frac{3{,}77}{3{,}9}\right)^3 = 79 \text{ кг},$$

а индукция возрастет до

$$9\,050 \sqrt{\frac{87{,}2}{79}} = 9\,500 \text{ гс}.$$

В таком же отношении изменятся данные для медных проводов

$$G'_м = 29{,}8 \frac{79}{87{,}2} = 27{,}0 \text{ кг},$$

$$\delta' = 2{,}11 \frac{9\,500}{9\,050} = 2{,}22 \text{ а/мм}^2.$$

Эти последние данные можно принять как исходные для дальнейших практических расчетов.

Для трансформатора 100 *ква* интересно сравнить полученные результаты с теми, которые получились бы, если за исходные данные были бы взяты те значения $\delta = 3{,}29$ *а/мм²* и $B = 13\,900$ *гс*, которые получились в конце расчета по табл. (1-2).

В этом случае m не изменяется

$$m = 1{,}43,$$

но вместо L_0 надо подсчитать Q_0 по формуле (1-15)

$$Q_0 = \frac{11{,}5P \cdot 10^2}{\sigma_м \; \sigma_{ст} \; \delta\beta} = \frac{11{,}5 \cdot 100 \cdot 10^2}{0{,}26 \cdot 0{,}75 \cdot 3{,}29 \cdot 1{,}39} = 12{,}9 \cdot 10^4.$$

Тогда по кривым приложения II (лист 3) для $m = 1{,}43$ получим

$$x = 2{,}35; \; y = 0{,}33; \; D^4/Q_0 = 0{,}432$$

или

$$D = \sqrt[4]{0{,}432 \cdot 12{,}9 \cdot 10^4} = 10 \cdot 1{,}54 = 15{,}4 \text{ см} = 154 \text{ мм}$$

и, следовательно,

$$H = 154 \cdot 2{,}35 = 362 \text{ мм}; \; F = 101{,}6 \approx 102 \text{ мм}; \; MO = 256 \text{ мм}.$$

Далее, по кривым приложения II (лист 7) находим для $y = 0{,}312$

$$f_м = 1{,}03; \quad f_{ст} = 15{,}3.$$

Тогда при $D^3 = 1{,}56^3 \cdot 10^3 = 3{,}65 \cdot 10^3$ *см³* получим веса по формулам (1-2) и (1-3):

$$G_м = 83{,}9 \cdot 0{,}26 \cdot 1{,}03 \cdot 3{,}65 = 82{,}0 \text{ кг},$$

$$G_{ст} = 5{,}93 \cdot 0{,}75 \cdot 15{,}3 \cdot 3{,}65 = 248 \text{ кг}$$

и следовательно, потери будут равны

$$P_м = 2{,}4 \cdot 3{,}29^2 \cdot 82{,}0 = 2\,130 \text{ вт},$$

$$P_{ст} = 1{,}4 \cdot 1{,}39^2 \cdot 248 = 671 \text{ вт}.$$

Если вес стали привести к весу эквивалентного медного провода, который стоит столько же, сколько стоит вес стали, то получим для первого случая

$$222 \frac{1}{3{,}5} = 63{,}5 \text{ кг меди провода}$$

и эквивалентный общий вес медного провода

$$87{,}7 + 63{,}5 = 151{,}2 \text{ кг}.$$

Аналогично для второго трансформатора получим эквивалентный общий вес медного провода

$$82{,}0 + \frac{248}{3{,}5} = 153{,}4 \text{ кг},$$

т. е. эквивалентные общие веса, и следовательно, стоимости почти не отличаются друг от друга, но получились иные распределения веса активных материалов и потерь.

Вполне естественно считать, что могут быть произведены другие какие-либо преобразования формулы (1-6), в результате чего могут получаться новые решения в виде абсолютных

минимумов. Таким образом, можно считать вполне закономерным существование значительно бо́льшего числа абсолютных минимумов, чем это указано в данной теории.

1-4. ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ

Рассматривая результаты предыдущих теоретических соображений видно, что случаи абсолютных минимумов получаются тогда, когда формула стоимости C (1-5) ограничивается только одной из формул (1-15), (1-17), (1-19) или (1-21). Эти формулы были выведены путем различных преобразований формулы (1-6) мощности трансформатора.

Можно ограничивать стоимость по формуле (1-5) не одной ограничивающей функцией, а двумя, т. е. считаются заданными не два технических параметра, например, потери $P_м$ и $P_{ст}$, а три, например, $P_м$, $P_{ст}$ и B индукция, для которой вводится новое ограничивающее уравнение.

Общие математические соображения показывают, что и в этом случае закономерно искать решения, как минимум функции (1-5) для стоимости трансформатора. Эти решения с дополнительными ограничениями будут уже являться некоторыми частными случаями по отношению к абсолютным минимумам и в дальнейшем называются частными экстремумами.

Наибольший интерес представляет собой решение, когда заданы потери $P_м$ и $P_{ст}$ и задана еще индукция B в стержне. Так как попрежнему осталось 3 неизвестных величины

$$D, x, y,$$

то решение этой задачи получается в виде трех уравнений с тремя неизвестными

$$x = \frac{y(4by + b + 3d)}{h(2y+1)}, \qquad (1\text{-}27)$$

$$\sqrt{\frac{\varphi xy}{(y+1)(hx+by+d)}}\,D = \frac{14{,}7P}{\sqrt{P_м P_{ст}}}\sqrt{\frac{\alpha_м \alpha_{ст}}{\sigma_м \sigma_{ст}}} = L_0, \qquad (1\text{-}28)$$

$$g_{ст} L_0^{-3} = (\varphi xy)^{-3/2}(y+1)^{3/2}(hx+by+d)^{5/2}. \qquad (1\text{-}29)$$

Формулы (1-27) и (1-28) повторяют ранее найденные формулы (1-12) и (1-17), формула (1-13) для m в данном случае уже значения не имеет. Левая часть (1-29) есть заданная величина, ибо $g_{ст}$ определяется по формуле

$$\frac{G_{ст}}{\frac{\pi}{4}\gamma_{ст}\sigma_{ст}\cdot 10^{-3}} = g_{ст} = (hx+by+d)D^3. \qquad (1\text{-}30)$$

Правая часть предыдущей формулы (1-29) легко вычисляется для тех пар значений x и y, которые удовлетворяют (1-27). Для упрощений вычислений в приложении II (листы 1 и 2) даны значения

$$\Psi_1 = g_{cm} L_0^{-3}, \qquad (1\text{-}31)$$

как функция y, а на листе 7 приложения II дана кривая для Ψ_1. Тем самым становится возможным решить основную задачу — по заданным значениям L_0 (1-17) и g_{cm} (1-30) найти Ψ_1 по (1-31) и далее y по кривой приложения II (лист 7). Дальнейший ход решения сводится к нахождению x по формуле (1-27) или по кривой приложения II (лист 7) и D/L_0 по формуле (1-17) или по кривой приложения II (лист 7).

Дальнейшее определение размеров модели, весов меди и стали и плотности тока производится таким же образом, как и для случая абсолютного минимума.

В качестве примера произведем перерасчет двух последних примеров табл. 1-2, задаваясь, кроме потерь $P_м$ и P_{cm}, еще значением индукции $B = 14\,500$ *гс*. Результаты этих вычислений даны в табл. 1-3. В этой таблице значения для P_{cm} и L_0 взяты из табл. 1-2.

$\alpha_{1,45}$ дает значение потерь в 1 *кг* стали при индукции $\beta = 1{,}45$, т. е. при $B = 14\,500$ *гс*. Все вычисления произведены в той последовательности, которая была указана выше.

При расчете трансформатора 1 800 *ква* контрольная цифра веса стали, полученная в конце расчете (2 680 *кг*) незначительно разошлась с заданной цифрой 2 630 *кг* из-за неизбежных неточностей при пользовании графиками. Для трансформатора 15 000 *ква* эти две цифры совпали лучше.

Сопоставляя данные табл. 1-2 и 1-3, легко видеть, что для частного экстремума увеличился диаметр остова, увеличился вес стали и уменьшился вес меди. Все же условная стоимость, выраженная в условных килограммах меди, получилась для частного экстремума больше, чем для абсолютного минимума. Так, для последнего мы получили бы для трансформатора 1 800 *ква* $\frac{1\,610}{3{,}5} + 476 = 936$ *кг*, для трансформатора 15 000 *ква* $\frac{9\,660}{3{,}5} + 2\,280 = 5\,047$ *кг*, т. е. трансформатор 1 800 *ква* в условиях указанного выше частного экстремума получился на 23% дороже, чем в условиях абсолютного минимума, а трансформатор 15 000 *ква* стал дороже на 38%.

В заключение следует отметить, что данная теория полностью подтверждает указание проф. В. А. Трапезникова [Л. 61], что при выводе законов стоимости Видмар допустил логическую ошибку, так называемый „порочный круг". Строгие математические выводы данной теории показывают, что „законы стоимости" Видмара ни в коем случае не являются законами и не могут служить руководящими указаниями при проектировании.

Таблица 1-3

	1 800 *ква*	15 000 *ква*
P_{cm}	8 300 *вт*	59 000 *вт*
$a_{1,45}$	$1,5\cdot 1,45^2 = 3,16$ *вт/кг*	3,16 *вт/кг*
G_{cm}	$\frac{8\,300}{3,16} = 2\,630$ *кг*	$\frac{59\,000}{3,16} = 18\,700$ *кг*
L_0	10,55 *см*	19,8 *см*
L_0^3	$1,174\cdot 10^3$ *см*³	$7,76\cdot 10^3$ *см*³
$g_{cm} = \frac{G_{cm}}{\frac{\pi}{4}\gamma_{cm} c_{cm}\cdot 10^{-3}}$	$\frac{2\,630\cdot 10^3}{0,785\cdot 7,55\cdot 0,75} = 5,92\cdot 10^5$	$\frac{18\,700\cdot 10^3}{0,785\cdot 7,55\cdot 0,75} = 4,22\cdot 10^6$
$\Psi_1 = g_{cm} L_0^{-3}$	$\frac{5,92\cdot 10^5}{1,174\cdot 10^3} = 505$	$\frac{4,22\cdot 10^6}{7,76\cdot 10^3} = 544$
y; x	$y = 0,264$; $x = 1,91$	$y = 0,248$; $x = 1,81$
$f_м$; f_{cm}	$f_м = 0,64$; $f_{cm} = 13,45$	$f_м = 0,57$; $f_{cm} = 13,0$
D/L_0	3,36	3,48
D	$D = 10,55\cdot 3,36 = 35,50$ *см* $= 355$ *мм*	$D = 19,8\cdot 3,48 = 68,9$ *см* $= 689$ *мм*
H; F	$H = 678$; $F = 177$	$H = 1\,250$; $F = 342$
MO	$MO = 542$ *мм*	$MO = 1\,031$ *мм*
D^3	$44,74\cdot 10^3$ *см*³	$327\cdot 10^3$ *см*³
$G_м$	$83,9\cdot 0,15\cdot 0,64\cdot 44,74 = 381$ *кг*	$83,9\cdot 0,1\cdot 0,57\cdot 327 = 1\,570$ *кг*
G_{cm}	$5,93\cdot 0,75\cdot 13,45\cdot 44,74 = 2\,680$ *кг*	$5,93\cdot 0,75\cdot 13\cdot 327 = 18\,900$ *кг*
δ	$\delta = 4,87$ *а/мм*²	$\delta = 5,77$ *а/мм*²
$C_{усл}$	$\frac{2\,680}{3,5} + 381 = 1\,144$	$\frac{18\,900}{3,5} + 1\,570 = 6\,970$

1-5. ПРИБЛИЖЕННЫЕ РЕШЕНИЯ

Ранее уже указывалось, что в ряде случаев заводских и учебных расчетов требуется быстро найти приближенные значения основных размеров остова трансформатора. В этих случаях имеется в виду, что дальнейшие уточнения этих размеров следует произвести в процессе размещения обмоток.

Ниже дается некоторое упрощение предыдущих теоретических формул, которое в конечном итоге приводит к системе кривых, по которым просто определяются основные размеры остова.

Вместо формулы (1-12) можно подобрать следующие приближенные формулы:

для трехфазных трансформаторов

$$x = 6{,}35y + 0{,}22, \tag{1-32}$$

для однофазных трансформаторов

$$x = 5{,}2y + 0{,}25. \tag{1-33}$$

Точно также вместо сложных формул (1-14) и (1-16), дающих зависимость между m и y, явно и неявно через x по формуле (1-12), можно получить простые приближенные формулы (для трехфазных трансформаторов)

для заданных плотности тока δ и индукции B

$$m = \frac{0{,}413}{y - 0{,}111} - 0{,}458, \tag{1-34}$$

для заданных потерь $P_м$ и $P_{ст}$

$$m = \frac{0{,}26}{y - 0{,}23} - 0{,}45. \tag{1-35}$$

Эти формулы (1-32)—(1-35) применимы в пределах от $y = 0{,}3$ до $y = 0{,}6$. В этих пределах погрешность не превышает 2%.

Далее можно, например, решив формулу (1-35) относительно y, подставить это значение y в формулу (1-32). Тогда все искомые величины, представленные ранее как функции x и y, могут быть представлены как функции одного параметра m:

$$\left.\begin{aligned} x &= 1{,}68\frac{m + 1{,}433}{m + 0{,}45}, \\ y &= 0{,}23\frac{m + 1{,}58}{m + 0{,}45}, \\ y + 1 &= 1{,}23\frac{m + 0{,}661}{m + 0{,}45}, \\ 3x + 8y + 5{,}6 &= 12{,}5\frac{m + 1{,}01}{m + 0{,}45}. \end{aligned}\right\} \tag{1-36}$$

Система уравнений (1-36) позволяет весьма наглядно исследовать те задачи, которые возникают из-за того, что параметр m, равный, как известно,

$$m = \frac{c_м}{c_{ст}} \cdot \frac{\gamma_м}{\gamma_{ст}} \cdot \frac{\sigma_м}{\sigma_{ст}}$$

становится переменным.

Однако, в области приближенных вычислений можно сделать еще один дальнейший шаг. Во многих случаях практических расчетов условие точного соответствия минимуму стоимости не играет главной роли, тогда как требуется быстро найти размеры трансформатора, более или менее по своей стоимости приближающегося к минимуму стоимости при заданных средних значениях тех или иных параметров, например потерь. В этом случае расчет по всем точным формулам, несмотря на всю простоту, потребовал бы слишком много времени и изучения слишком большого числа приведенных выше закономерностей.

Тогда для быстрого определения ориентировочных размеров трансформатора можно заранее произвести ряд расчетов, пользуясь вышеизложенной теорией. Результаты этих расчетов приведены на кривых в приложении III (листы 1, 2 и 3), дающих диаметр D, высоту H и расстояние между осями сердечников MO. Согласно установившейся практике на листе 1 приложения III значения для диаметра D взяты, как средние из значений, получающихся для разных рабочих напряжений обмоток высшего напряжения трансформаторов одной и той же мощности. Это объединение размеров диаметров делается для уменьшения числа разнообразных деталей трансформаторов одной мощности, что облегчает условия производства.

Для других размеров трансформатора — для высоты H и расстояния между осями MO такое объединение размеров мало рационально и потому на листах 2 и 3 приложения III дан ряд кривых в зависимости от класса рабочего напряжения обмоток высшего напряжения.

Допустимость объединения диаметров D объясняется тем, что кривая стоимости трансформатора в зависимости либо от D, либо от переменных x и y подходит к своему минимуму весьма медленно при значительном изменении либо D, либо x, либо y. Эта особенность уже неоднократно подчеркивалась в ряде теоретических работ.

Для облегчения пользования кривыми листов 1, 2, 3 приложения III можно дать следующие общие указания. При расчете трансформатора заданной мощности и с заданными техническими параметрами изменение диаметра сердечника в сторону увеличения от указанных на листе I приложения III средних значений влечет за собой:

1) уменьшение высоты при почти постоянной ширине окна,
2) увеличение веса стали и уменьшение веса меди и
3) следовательно, уменьшение индукции и увеличение плотности тока,
4) уменьшение величины тока холостого хода,
5) увеличение удельной тепловой нагрузки на единицу охлаждающей поверхности обмотки.

Эти общие указания несколько облегчают выбор вариантов, необходимых для достаточно хорошего совпадения значений параметров, полученных по расчету, с заданными значениями параметров.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОСТОВ ТРАНСФОРМАТОРА

2-1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ О ТИПАХ КОНСТРУКЦИИ

Основными частями трансформатора являются: *остов*, *обмотка* и *бак*. Основные электромагнитные нагрузки трансформатора зависят от тех или иных конструктивных форм остова и обмоток трансформатора. Поэтому здесь первоначально делается краткое описание конструктивных форм остова и обмоток. Выполнения же баков трансформаторов, представляющих собой часто весьма сложную механическую конструкцию, разбираются в дальнейшем (см. главу 5) лишь с точки зрения необходимых условий охлаждения остова и обмоток, не касаясь вопросов прочности самих баков и их деталей. Конструктивные формы остова и обмоток тесно связаны между собой. В настоящее время после нескольких десятилетий развития трансформаторостроения можно указать на господствующие типы конструкций. Но одновременно с ними можно встретить у иностранных заводов несколько совершенно отличных типов. Так, например, круглая форма катушек является самой распространенной для силовых трансформаторов. Тем не менее, в настоящее время продолжают делать мощные трансформаторы с катушками прямоугольной и даже овальной, или эллиптической формы. Точно также наряду с наиболее распространенным стержневым типом остова, встречаются также современные мощные силовые трансформаторы броневого типа.

Вероятнее всего то, что в начальный период трансформаторостроения преимущества и недостатки различных конструктивных форм были мало ощутимы. Поэтому выбор иностранными заводами тех или иных форм определялся рекламными соображениями или патентными запретами. Затраченный капитал на первоначальное оснащение производства и «доброе

имя» той или иной фирмы требовали дальнейшей последовательной разработки условий производства выбранной формы конструкции. Дальнейшее развитие техники привело к тому, что выявилась наиболее рентабельная форма конструкции. Менее же рентабельные формы постепенно отмирали вместе с фирмами, их изготовлявшими. Только наиболее мощные фирмы, вкладывая значительные дополнительные средства на оснащение производства, могли позволить себе придерживаться и далее совершенствовать малораспространенные формы конструкции и тем самым сохранить рекламное «лицо» фирмы.

Наряду с этим одновременным существованием господствующих и мало распространенных форм конструкции, необходимо еще отметить те формы, которые являются результатом искания новых форм. Так, например, можно указать на сердечники, намотанные из непрерывной стальной ленты, на сердечники с радиально расположенными листами стали или на специальную форму трехфазных остовов со строго симметричными длинами магнитных путей (что позволяет для мощных трансформаторов применять индукции 16 000—17 000 *гс* и простыми способами компенсировать высшие гармоники тока холостого хода), или, наконец, на сердечники с листами, расположенными по эвольвенте (предложение Видмара — сведений о промышленном применении этих «эвольвентных» сердечников не имеется).

Ниже даются общие руководящие указания для наиболее распространенных конструктивных форм. Эти указания не являются полным описанием всех деталей трансформатора, но выделяют из общей массы конструктивных элементов те основные, которые непосредственно влияют на весь расчет трансформатора.

2-2. ТЕОРИЯ СТУПЕНЧАТОГО СЕЧЕНИЯ СТЕРЖНЯ

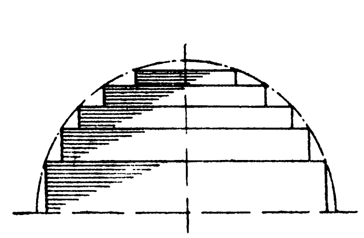
Как известно, для уменьшения потерь энергии в стали, вызванных вихревыми токами и гистерезисом, сердечники трансформаторов изготавливаются из тонких (0,35 или 0,5 *мм*) изолированных друг от друга листов специальной стали с большим (3,6—4%) содержанием кремния.

Для обмоток, имеющих катушки круглой формы, очевидно, следовало бы придать сечению стержня такую форму, которая лучше всего приближалась бы к окружности. В этом случае получилось бы наилучшее использование пространства внутри катушки. Для этой цели *сечению стержня придают многоступенчатую форму*, составляя его из листов сначала одной ширины, потом другой, далее третьей и т. д. (фиг. 2-1).

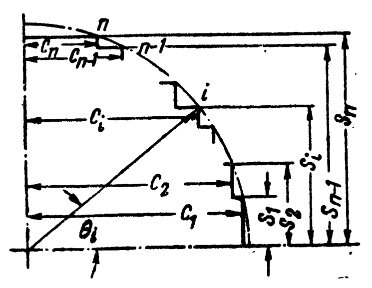
Задача выбора ширины листов стали для получения наибольшего сечения с заданным числом ступеней решается, как задача о максимуме функции многих переменных. Возникаю-

щие при этом трудности при вычислениях обходятся обычно графическим решением системы уравнений.

Решение задачи о максимуме многоступенчатого сечения получается следующим образом. Если через C_i и S_i обозначить косинус и синус угла θ_i (фиг. 2-2), образуемого лучом



Фиг. 2-1. Многоступенчатое сечение стержня.



Фиг. 2-2. Обозначение ступеней сечения стержня.

из центра через i-тую ступень сечения, то сечение Q многоступенчатой фигуры будет равно (для одной четверти круга при радиусе, равном единице)

$$Q = C_1 S_1 + C_2 (S_2 - S_1) + C_3 (S_3 - S_2) + \ldots + C_n (S_n - S_{n-1}). \tag{2-1}$$

Беря n производных от Q по углам $\theta_1, \theta_2, \ldots \theta_n$ и приравнивая эти производные нулю, получим систему тригонометрических уравнений

$$\left.\begin{aligned} C_2 &= \frac{C_1^2 - S_1^2}{C_1} \\ C_3 &= \frac{C_2^2 - S_2^2}{C_2} + S_1 T_2, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ C_n &= \frac{C_{n-1}^2 - S_{n-1}^2}{C_{n-1}} + S_{n-2} T_{n-1}, \\ S_n^2 &- 0{,}5 S_{n-1} S_n - 0{,}5 = 0. \end{aligned}\right\} \tag{2-2}$$

Здесь T_i — условно обозначает тангенс угла θ_i. Путем простых преобразований систему (2-2) можно представить в виде

$$\left.\begin{aligned} &C_2 = \frac{C_{2(1)}}{C_1}; \quad C_3 = \frac{C_{2(2)} + S_1 S_2}{C_2} \ldots \\ &\ldots C_n = \frac{C_{2(n-1)} + S_{n-2} S_{n-1}}{C_{n-1}}; \quad S_n^2 - 0{,}5 S_{n-1} S_n - 0{,}5 = 0, \end{aligned}\right\} \tag{2-3}$$

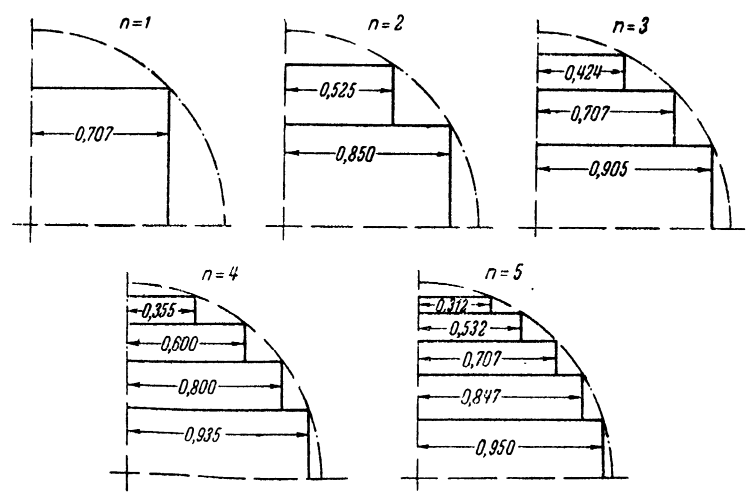
где $C_{2(i)} = \cos 2\theta_i$.

Как это было указано выше, решение этой системы уравнений может быть проще всего получено графически, причем эти вычисления сильно упрощаются, если принять во внимание необходимую симметрию фигуры по отношению к лучу, составляющему угол 45° с осями. Эти решения приведены в табл. 2-1 (фиг. 2-3).

Таблица 2-1

Число ступеней фигуры	Размеры ступеней в долях радиуса (косинусы)	$\sigma_ф$ Площадь фигуры в долях площади окружности
1	$C_1=0{,}707$	0,636
2	$C_1=0{,}850$; $C_2=0{,}525$	0,786
3	$C_1=0{,}905$; $C_2=0{,}707$; $C_3=0{,}424$	0,851
4	$C_1=0{,}935$; $C_2=0{,}800$; $C_3=0{,}600$; $C_4=0{,}355$	0,886
5	$C_1=0{,}950$; $C_2=0{,}847$; $C_3=0{,}707$; $C_4=0{,}532$; $C_5=0{,}312$	0,908

Необходимо указать, что значения, данные в последнем столбце табл. 2-1, т. е. коэффициенты площади фигуры в долях от площади окружности, не дают еще действительного актив-



Фиг. 2-3. Максимумы многоступенчатых сечений.

ного сечения. Последнее будет несколько меньше, так как необходимо учесть толщину изоляции между листами стали. Для наиболее ходовых способов изоляции листов стали — оклейка бумагой, лакировка и оксидная пленка и для нормальных толщин листов стали 0,35 и 0,5 *мм* необходимо площадь много-

ступенчатой фигуры умножить еще на один из поправочных коэффициентов, указанных в табл. 2-2.

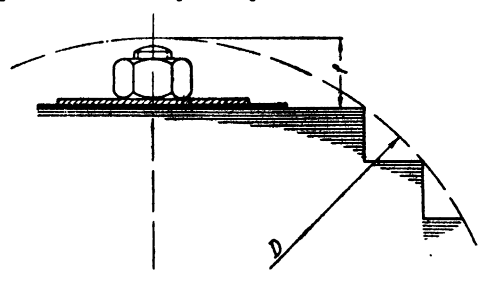
Таблица 2-2

Толщина стали, *мм*	0,35		0,5		
Способ изоляции	Оклейка	Лакировка	Оклейка	Лакировка	Оксидная пленка
Поправочный коэффициент	0,85	0,9	0,875	0,93	0,96

Таким образом, максимальный коэффициент заполнения трехступенчатого сечения сердечника для оклеенной стали толщиной 0,5 *мм* будет равен

$$\sigma_{ст} = 0{,}875 \cdot 0{,}851 = 0{,}745.$$

В теоретических расчетах для $\sigma_{ст}$ в среднем было принято значение 0,75, т. е. весьма близкое к трехступенчатому сечению из стали 0,5 оклеенной бумагой. Однако, это вовсе не значит, что обычно применяется трехступенчатое сечение сердечника. Наоборот, чаще всего берут число ступеней больше трех, но некоторые причины заставляют отступать от размеров, указанных в табл. 2-2, т. е. уклоняться от максимальной площади сечения фигуры.



Фиг. 2-4. Деталь прессовки стержня.

Необходимо иметь в виду, что для многоступенчатых сечений по табл. 2-1 стрела f (фиг. 2-4) оказывается слишком малой для размещения приспособлений для прессовки сердечника, т. е. гаек и головок болтов, нажимных и изоляционных пластин и т. п. Поэтому на практике для сечений с тремя или более ступенями приходится значительно уклоняться от размеров, указанных в табл. 2-1. Ниже дается краткое изложение работ автора по математическому решению задачи о максимуме многоступенчатого сечения, если задано дополнительное условие.

Допустим (фиг. 2-2), что размер наименьшей ступени задан, т. е.

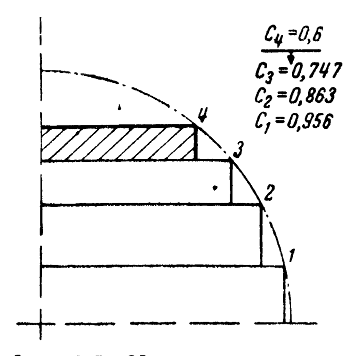
$$C_n = \text{const}.$$

В этом случае максимум сечения Q, определяемого по формуле (2-1), найдется путем дифференцирования по углам θ_1, θ_2 ... θ_{n-1}. В результате получим систему уравнений

$$C_2 = \frac{C_{2(1)}}{C_1}; \quad C_3 = \frac{C_{2(2)} + S_1 S_2}{C_2}; \ldots$$

$$\ldots C_n = \frac{C_{2(n-1)} + S_{(n-2)} S_{(n-1)}}{C_{n-1}}, \qquad (2\text{-}4)$$

т. е. такую же систему уравнений, как и система (2-3), но без последнего уравнения. Система (2-4) $(n-1)$ уравнений содержит $(n-1)$ неизвестных углов,—косинус C_n— нам задан.



Фиг. 2-5. Максимум четырехступенчатого сечения при заданной меньшей ступени.

Эту систему проще всего решать графически, для чего следует вычислить семейство кривых, задаваясь различными значениями C_1. Это семейство кривых дано на листе 1 приложения IV.

Пусть для четырехступенчатого сечения ($n = 4$) задано, что

$$C_n = 0{,}6.$$

Берем на оси ординат точку 0,6 и проводим горизонталь до пересечения с кривой с отметкой C_4. Тогда на оси абсцисс получим значение $C_1 = 0{,}956$. Для этого значения C_1 найдем, пересекая кривые с отметками C_2, C_3, значения на оси ординат $C_3 = 0{,}747$, $C_2 = 0{,}863$. Таким образом, если задано $C_4 = 0{,}6$, то максимум сечения четырехступенчатого сечения получится для значений (фиг. 2-5)

$$C_3 = 0{,}747; \quad C_2 = 0{,}863; \quad C_1 = 0{,}956.$$

По обычным таблицам тригонометрических функций для данных косинусов найдем соответствующие синусы

$$S_4 = 0{,}8; \quad S_3 = 0{,}665; \quad S_2 = 0{,}505; \quad S_1 = 0{,}295.$$

Поэтому по формуле (2-1) найдем

$$Q = 0{,}956 \cdot 0{,}295 + 0{,}863\,(0{,}505 - 0{,}295) + 0{,}747\,(0{,}665 - 0{,}505) +$$
$$+ 0{,}6\,(0{,}8 - 0{,}665) = 0{,}6645.$$

Так как площадь сечения одной четверти круга с радиусом 1 равна 0,785, то коэффициент площади этой четырехступенчатой фигуры будет равен

$$\sigma_\phi \frac{0{,}665}{0{,}785} = 0{,}846,$$

т. е. примерно на 4,5% меньше. чем, максимальное сечение (0,886) по табл. 2-1. Очевидно, для нахождения действительного сечения необходимо этот коэффициент 0,846 умножить на один из коэффициентов табл. 2-2.

Нетрудно видеть, что кривые листа 1 приложения IV решают задачу о максимуме сечения и в том случае, если задано значение стрелы f (фиг. 2-4).

На самом деле пусть стрела f составляет 10%, т. е. должно быть $S_n=0{,}9$. Пусть $n=3$. Тогда по таблицам тригонометрических функций найдем $C_3=0{,}436$ и далее тем же способом получим

$$C_2=0{,}718,\quad C_1=0{,}917,\quad Q=0{,}658 \text{ и } \sigma_\phi=0{,}713.$$

Несмотря на то, что кривые листа 1 приложения IV выведены в предположении, что $C_n=\mathrm{const}$, т. е. заданная величина, эти кривые имеют весьма общий характер. Так, многоступенчатые фигуры, приведенные в табл. 2-1, получаются на кривых листа 1 приложения IV, как частный предельный случай сечения фигуры с $(n+1)$ числом ступеней, когда последняя $(n+1)$-я ступень обращается в нуль. В этом случае значения, полученные для остальных n ступеней, дают максимум площади сечения фигуры; эти значения и приведены в табл. 2-1.

Аналогичным образом, если положить, что задан размер наибольшей прямой, т. е. $C_1=\mathrm{const}$ (фиг. 2-2), то после нахождения производных формулы (2-1) по θ_2, $\theta_3 \ldots \theta_n$, мы получим систему уравнений

$$\left.\begin{aligned} S_{n-1}=-\frac{C_{2(n)}}{S_n};\ \ldots\ S_2=\frac{-C_{2(3)}+C_3C_4}{S_3};\\ S_1=\frac{-C_{2(2)}+C_2C_3}{S_2}. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}5)$$

Здесь синус S_1 надо считать известной величиной. Так же, как и вычисление системы (2-4), вычисление системы (2-5) проще всего сделать, задаваясь различными значениями S_n. Тогда получается система кривых, показанная на листе 2 приложения IV. Только для удобства пользования шкалами этих кривых на фигуре листа 2 приложения IV наибольшая ступень обозначена не C_1, как на фиг. 2-2, а обозначена C_n, т. е. счет ступеней начинается с верхней наименьшей ступени.

Пусть, как и в предыдущем примере для кривых листа 1 приложения IV, дано, что $n=4$, но

$$C_n=C_4=0{,}6.$$

Тогда, проводя из ординаты $C_4=0{,}6$ на листе 2 приложения IV горизонталь до пересечения с кривой с отметкой C_4 найдем, что

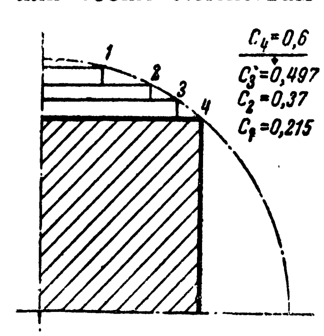
$$C_1=0{,}215,$$

а точки пересечения этой вертикали с кривыми с отметками C_3 и C_2 дают ординаты

$$C_2=0{,}37 \text{ и } C_3=0{,}497.$$

Сопоставление расчетов по обоим семействам кривых дано на фиг. 2-5 и 2-6, т. е. когда заданы размеры крайней наименьшей ступени, или наибольшей. Из этого сопоставления видно, что эти два решения совершенно независимы друг от друга и являются решениями двух различных задач.

Возьмем решения по обеим системам формул (2-4) и (2-5) или обоим семействам кривых при условии, что наименьшая ступень первой системы равна наибольшей ступени второй системы, но каждое решение ищется для разного числа ступеней n и m. Тогда совокупность обоих решений даст решение для сечения с $(n+m-1)$ ступенями, когда задана какая-то промежуточная ступень, и мы получим «максимум из середины». Легко доказать, что это составное решение для «максимума из середины» даст всегда меньшую площадь, чем максимум сечения с $(n+m-1)$ ступенями, если заданы дополнительные условия в виде размеров наибольшей или наименьшей ступеней, равных наибольшей или наименьшей ступени составной фигуры.



Фиг. 2-6. То же при заданной большей ступени.

Таким образом, мы получаем, что эти системы формул позволяют решать задачи о нахождении размеров ступеней, дающих максимумы сечения, если:

а) задано лишь число ступеней,

б) задано число ступеней и размер наименьшей ступени,

в) задано число ступеней и размер наибольшей ступени,

г) задано число ступеней и размер любой промежуточной ступени.

Решения для случаев, когда задано 2 размера ступеней, получаются весьма громоздкими.

2-3. ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ ЯРМА

Теоретически вопрос формы сечения ярма весьма мало разработан. С точки зрения теоретического расчета на форму сечения ярма не накладывается никаких ограничений. Поэтому прежде всего возникает стремление придать сечению ярма наиболее простую для производства форму, а именно прямоугольную.

В этом случае получаются более или менее простые формулы, учитывающие увеличение сечения ярма или, как говорят, усиление ярма.

Изложенная в главе 1 теория расчета позволяет найти решения, не осложняя вопроса тем условием, что ярмо и

стержень могут иметь различное сечение. Отсюда следует, что вопрос усиления ярма принимает уже второстепенное значение. В силу этого все математические выкладки главы 1 были произведены без учета усиления ярма, хотя можно было бы довольно просто, вводя переменную

$$\xi = \frac{Q_{яр}}{Q_{сер}}, \tag{2-6}$$

получить уже целую систему кривых для разных значений ξ. В формуле (2-6) $Q_{яр}$ обозначает активное сечение ярма, а $Q_{сер}$ — активное сечение сердечника. В этом случае кривые приложения II относились бы к случаю, когда $\xi = 1$. Для некоторых случаев абсолютных минимумов учет усиления ярма приводит к весьма простым изменениям формул главы 1. Это относится к тем случаям, когда задано значение индукции B. Тогда, например, для случая, когда заданы плотность тока δ и индукция B в стержне, при подсчете веса стали надо в формуле (1-3) подставить вместо $hx + by + d$ выражение $hx + b'y + d'$, где $b' = \xi b$ и $d' = \xi d$. Дальнейшие преобразования, производимые указанным в главе 1 способом, дают возможность сделать следующее сопоставление (см. табл. 2-3) значений различных величин для случаев, когда ярмо не усилено и когдя ярмо усилено.

Таблица 2-3

	Постоянное Q_0 формула (1-15)	Параметр m формула (1-13)	Переменные		Диаметр стержня D формула (1-15)	Вес	
			y формула (1-1)	x формула (1-1)		меди $G_м$ формула (1-2)	стали $G_{ст}$ формула (1-3)
Без усиления ярма $\xi = 1$	Q_0	m	y	x	D	$G_м$	$G_{ст}$
С усилением ярма ξ	Q_0	m	y	ξx	$\xi^{-1/4} D$	$\xi^{1/4} G_м$	$\xi^{1/4} G_{ст}$

При подсчете потерь следует иметь в виду, что усиление сечения ярма приводит к увеличению веса ярма, но одновременно и к увеличению сечения ярма. Отсюда следует, что $B_{яр}$ — индукция в ярме будет меньше в ξ раз, чем B индукция в стержне

$$B_{яр} = \frac{B}{\xi}. \tag{2-7}$$

Поэтому потери в усиленном ярме уменьшатся, и при вычислении потерь в стали по ее весу надо подставить вместо

$hx+by+d$ выражение $hx+b''y+d''$, где теперь $b''=\frac{b}{\xi}$ и $d''=\frac{d}{\xi}$. Поэтому, сопоставляя общие потери в стали P''_{cm} для остова с усиленным ярмом с общими потерями в стали P_{cm} для $\xi=1$, получим более сложную формулу, а именно

$$P''_{cm}=\xi^{1/4}\frac{h\xi^2x+by+d}{hx+by+d}P_{cm}.$$

Потери же меди $P''_{м}$ для случая усиленного ярма в $\xi^{1/4}$ больше потерь $P_{м}$ в меди для случая ярма без усиления, т. е.

$$P''_{м}=\xi^{1/4}P_{м}.$$

Таким образом, с математической точки зрения вопрос усиления ярма сводится лишь к более простому или более сложному изменению конечных формул. В качестве примера можно указать, что для случая, когда заданы $P_{м}$ и P_{cm}, вместо формулы (1-12) получается формула

$$x=\frac{y[(9\varkappa-1)b''y+b''(3\varkappa-1)+6d'']}{h(4y+3\varkappa-1)},$$

где

$$\varkappa=\frac{hx+b'y+d'}{hx+b''y+d''}$$

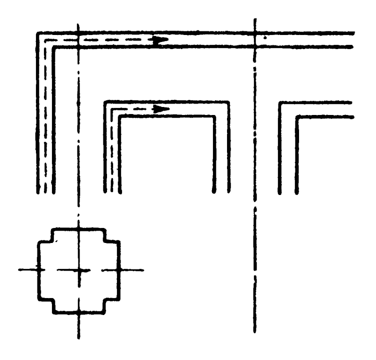
и попрежнему $b'=\xi b$; $d'=\xi d$; $b''=\frac{b}{\xi}$; $d''=\frac{d}{\xi}$. Эта формула несколько менее удобна для вычислений, ибо $\varkappa$ есть функция x и y.

При этих расчетах принималась весьма простая зависимость потерь от веса. Однако, легко видеть, что даже для простой прямоугольной формы сечения ярма приходится сталкиваться с вопросом перераспределения магнитного потока по сечению стержня и ярма и в углах остова. Это перераспределение магнитного потока так осложняет расчет, что ряд возникающих при этом вопросов не получил еще исчерпывающих решений. Эти трудности расчета, конечно, не могут уменьшиться от того, что из-за ряда конструктивных соображений ярму придается ступенчатая форма.

Вообще считалось, что искажения в распределении потоков по сечению ярма и стержня будут наименьшими, если будут сохраняться одинаковые формы сечения как стержня, так и ярма. Некоторые фирмы весьма последовательно придержи-

вались этого принципа в своих конструкциях. Однако, несомненно, что в этом случае длины силовых нитей в одном и том же пакете будут разными в зависимости от того, ближе к какому краю, к внутреннему или внешнему (фиг. 2-7), проходит силовая линия. Более же короткие силовые линии располагаются более густо, чем длинные линии и, следовательно, там, где проходят более короткие силовые линии, индукция, т. е. плотность силовых линий по сечению стержня, будет больше.

Во всех этих случаях следует ожидать перераспределения потока по сечению стержня и ярма. Математически эта задача весьма сложна — она имеет графическое решение для случая, если потоки создаются постоянным током. Для намагничения переменным током пока еще не найдены достаточно достоверные решения.

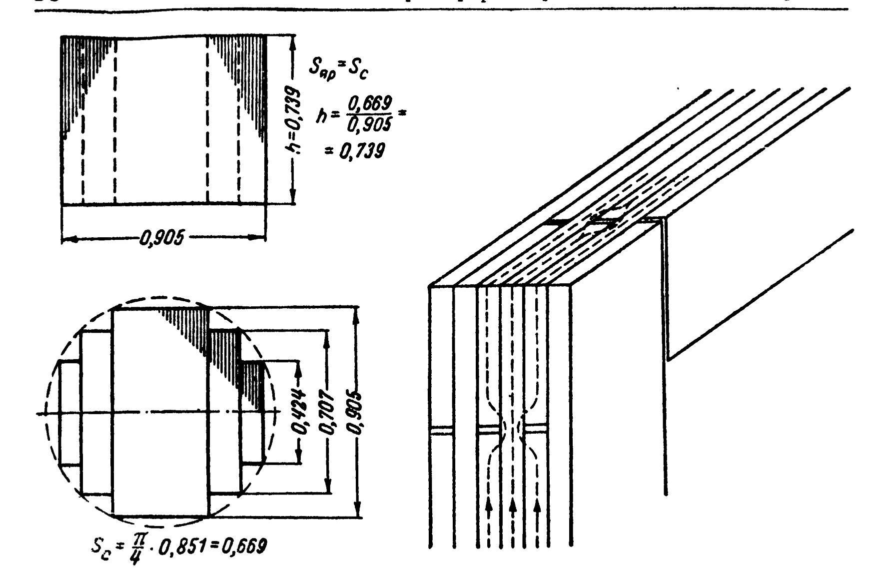


Фиг. 2-7. Различные длины магнитных силовых линий.

В тех случаях, когда ярмо имеет более простую форму сечения, чем стержни (а это бывает чаще всего), предыдущие соображения осложняются еще тем, что разные ступени (пакеты) могут иметь разное усиление сечения или даже для некоторых пакетов ослабление сечения. Так на фиг. 2-8 показано трехступенчатое сечение стержня, которое сочленяется с ярмом прямоугольного сечения, имеющего ту же площадь сечения, что и сердечник. Однако, приведенные на фиг. 2-8 размеры, показывают, что для наименьшей ступени сердечника соответствующий ему пакет ярма имеет сечение, усиленное на 74%, средняя ступень имеет усиление порядка 5%. Зато наибольшей ступени соответствует в ярме пакет, имеющий сечение всего 82% от сечения наибольшей ступени сердечника. Ясно, что из-за этого картина перехода потока из пакета крайне усложняется. Стыки листов при шихтованной сборке (фиг. 2-9) также вносят новые нарушения в распределении магнитного потока.

В первом приближении задача о перераспределении потока была разрешена для плоскопараллельного постоянного поля, но это решение практически не получило широкого применения из-за сложности математических вычислений.

Наконец, можно указать еще на другие причины, усложняющие картину прохождения потока по листам стали. Обработка листов стали — резка, шлифовка заусенцев, штамповка отверстий вызывают увеличение потерь в стали из-за изменения кристаллической структуры металла. Потери в стали и ток



Фиг. 2-8. Трехступенчатое сечение стержня и прямоугольное сечение ярма.

Фиг. 2-9. Стык листов стали в углах остова.

намагничения увеличиваются при прохождении магнитного потока в направлении, перпендикулярном направлению прокатки листов стали.

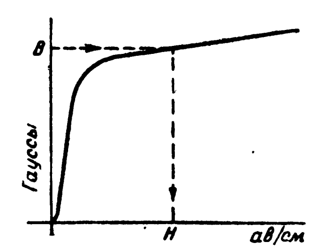
2-4. ПРАКТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ В СТАЛИ И ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА

Большинство вопросов, вызванных условиями перераспределения потока в остове, до сих пор мало изучены.

Обычно считается, что для практики можно признать вполне удовлетворительной конструкцию и технологическую обработку, если удельные потери при испытании готового трансформатора незначительно (12—15%) превышают удельные потери образцов стали, измеренные на аппарате Эпштейна. При этих оценках большое значение имеет методика расчета потерь. Кривые для расчета удельных потерь в стали трансформаторов или соответствующие таблицы получаются опытным путем, как результат пересчета по выбранной, как указано выше, методике расчета данных, полученных при испытании ряда трансформаторов. Эти кривые, таким образом, дают повышенные значения удельных потерь, по сравнению с потерями, получаемыми при испытании образцов стали в аппарате Эпштейна.

Расчетные кривые намагничивающего тока составляются таким же образом, т. е. устанавливается та или иная методика

расчета, а опытные кривые, полученные при испытании готовых трансформаторов, так перерабатываются, чтобы получалось наилучшее совпадение результатов измеренных токов с расчетом по вышеуказанной методике. Таким образом, расчетные кривые для определения потерь и тока холостого хода могут быть использованы для расчета только тогда, когда известна выбранная методика расчета и известны также те типы конструкции трансформаторов, данные испытаний которых были положены в основу составления расчетных кривых.



Фиг. 2-10. Кривая намагничения стали (схематично).

При расчете тока холостого хода у трехстержневых трансформаторов следует иметь в виду, что эти токи будут различными для разных фаз. У крайних стержней путь магнитного потока длиннее, чем для среднего стержня. Кроме того, при применяемых обычно насыщениях стали около 14 500 *гс* начинает сказываться и схема соединения намагничивающих обмоток в звезду и в треугольник. Расчетные кривые [см. таблицу приложения V (лист 2)] составлены так, что дают среднее значение тока холостого хода для трех фаз при схеме соединения в звезду.

Выбирая тот или иной способ расчета, приходится всегда учитывать возможную точность получаемых результатов расчета, общую затрату времени на этот расчет и общее технико-экономическое значение рассчитываемой величины.

Для расчета потерь и тока холостого хода трансформаторов пользуются обычно следующим способом. Все опытные данные, характерные для данного сорта стали и типа конструкции, даются в виде удельных величин, т. е. отнесены к 1 *кг* веса стали. Поэтому определение значений искомых величин получается путем умножения опытного коэффициента на вес стали. Так, потери в стали P_{cm} в ваттах равны

$$P_{cm} = G_{cm} k_{cm}, \qquad (2\text{-}8)$$

где k_{cm} — коэффициент удельных потерь (на 1 *кг* стали), зависящий от индукции [см. таблицу приложения V (лист 2)], а G_{cm} — вес стали остова.

Аналогичная формула может быть получена и для расчета тока холостого хода, если ввести понятие намагничивающей мощности $P_0 = UI_0$, получаемой как произведение тока холостого хода I_0 на напряжение сети U.

На самом деле, если по кривой намагничения стали [фиг. 2-10] для данного значения индукции B найти напря-

женность H *ав/см*, то, зная l длину средней магнитной силовой линии в сантиметрах получим, что намагничивающий ток I_μ может быть найден по формуле

$$I_\mu = \frac{Hl}{n}, \qquad (2\text{-}9)$$

где n — число витков в катушке.

Если обе части формулы (2-9) умножить на U — напряжение катушки в *в*, то после простых преобразований получим

$$UI_\mu = \frac{Hl}{n} U = \frac{Hl}{n} \cdot 4{,}44 fnBQ_a \cdot 10^{-8} =$$

$$= 4{,}44 fQ_a lBH \cdot 10^{-8} \frac{\gamma}{\gamma} \cdot 10^{-3} = 4{,}44 \frac{f}{\gamma} G_{cm} BH \cdot 10^{-11} =$$

$$= \left[4{,}44 BH \frac{f}{\gamma} \cdot 10^{-11} \right] G_{cm} = k_\mu Q_{cm}, \qquad (2\text{-}10)$$

здесь f — частота в *гц*;
B — индукция в *гс*;
Q_a — активное сечение сердечника в *см*^{2}.

Коэффициент 10^{-3} введен для перевода всех размеров в дециметры, так как удельный вес γ обычно дается в *кг* на *дм*^{3}. Таким образом, получаемый опытным путем коэффициент равен

$$k_\mu = 4{,}44 BH \frac{f}{\gamma} \cdot 10^{-11}. \qquad (2\text{-}11)$$

Он зависит от произведения значения индукции B на магнитную напряженность H, взятых по кривой намагничения.

Пренебрегая значением активных потерь в стали и потерь в намагничивающих обмотках, обычно считают, что

$$UI_\mu \approx UI_0 = P_{i0}. \qquad (2\text{-}12)$$

Тогда ток холостого хода легко найдется по формуле

$$I_0 = \frac{P_{i0}}{U}, \quad (a) \qquad (2\text{-}13)$$

или в процентах

$$i_0 = \frac{P_{i0}}{10P}, \qquad (2\text{-}14)$$

где P — мощность трансформатора в *ква*.

Значение суммы активных потерь в стали и в намагничивающих обмотках при холостом ходе обычно раз в 8—10 меньше намагничивающей мощности. Кроме того, составляющая тока активных потерь находится в квадратуре с первой

гармоникой намагничивающего тока I_μ. Поэтому приближенное равенство (2-12) оказывается достаточно точным при расчете силовых трансформаторов. Лишь в некоторых случаях, как, например, при расчете измерительных трансформаторов напряжения и тока требуется более точный расчет.

Если магнитопровод (остов) имеет разные сечения и, следовательно, разные индукции, например, если B_c—индукция в стержне и G_c—вес стержня, а $B_{яр}$—индукция в ярме и $G_{яр}$—вес ярма, то потери в стали найдутся, как

$$P_{ст} = k'_{ст} G_c + k''_{ст} G_{яр}, \tag{2-15}$$

где $k'_{ст}$ — коэффициент потерь при индукции B_c, а $k''_{ст}$ аналогичный коэффициент потерь при индукции $B_{яр}$ [по таблице приложения V (лист 2)]. Аналогичным образом намагничивающая мощность в этом случае будет равна

$$P_0 = k'_\mu G_c + k''_\mu G_{яр}, \tag{2-16}$$

где k'_μ и k''_μ — коэффициенты намагничивающей мощности при индукциях B_c и $B_{яр}$ по таблице приложения V (лист 2).

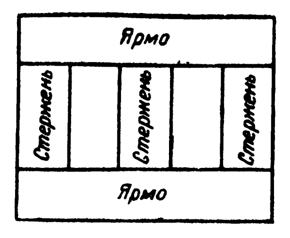
Таблица удельных потерь и намагничивающей мощности [приложение V] составлена, исходя из того, что остов разделяется на стержни и ярма так, как показано на фиг. 2-11. Такое разделение, конечно, совершенно условно. Но если бы был принят другой способ разделения остова на стержни и ярма, как, например, показано на фиг. 2-12, то, очевидно, пришлось бы несколько иначе откорректировать расчетные кривые.

Существуют также и другие методы расчета тока холостого хода, основанные на том, что в качестве исходных данных берутся опытные кривые намагничения колец стальных листов. Для расчета же трансформаторов вводятся еще поправки, учитывающие неизбежные стыки, получающиеся при шихтовке стали. Так, для обычного способа шихтовки стали, показанного на фиг. 2-13 для трехфазного трансформатора, считается, что должна быть введена поправка для семи стыков. Но оценка действительного зазора в этих стыках не может быть произведена достаточно точно. Равным образом еще нет удовлетворительных, хорошо обоснованных способов расчета того значения намагничивающей силы, которое потребуется в том случае, если стык перекрыт сплошным листом (фиг. 2-14), как это всегда получается при шихтовке по способу, указанному на фиг. 2-13.

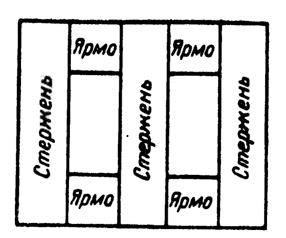
В данной работе поэтому предлагается более простой, указанный выше, метод расчета тока холостого хода, а влияния стыков листов на значение удельной намагничивающей мощ-

ности учитываются поправочными коэффициентами, приведенными внизу листа 2 приложения V.

Ранее было уже указано, что расчетные таблицы [приложение V (лист 2)] дают более высокие значения удельных

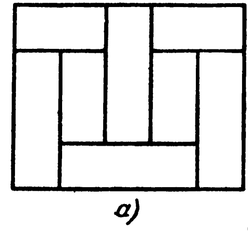


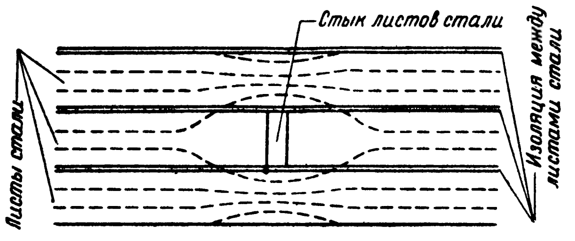
Фиг. 2-11. Употребительная схема подразделения остова на стержень и ярмо.



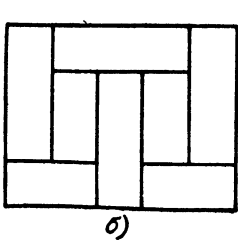
Фиг. 2-12. Малоупотребительная схема подразделения остова.

потерь в стали, чем в аппарате Эпштейна. Более детальные опыты показали, что эта разница в удельных потерях происходит, с одной стороны, из-за повышения потерь в листах, вызванного технологическими процессами — резки, штамповки,





Фиг. 2-14. Изгиб магнитных силовых линий на стыке шихтованных листов.



Фиг. 2-13. План шихтовки трехфазного остова.

а — 1-е положение листов; б — 2-е положение листов.

шлифовки листов стали. С другой стороны, появляются потери в различных конструктивных деталях — в прессующих болтах, в стальных балках, прессующих ярма, в баке трансформатора. По этой причине в стандартах на трансформаторы нормируются не потери в стали, а потери в остове со всеми вышеуказанными сопутствующими потерями. Этими соображениями и объясняется введение термина «потери холостого хода». Ниже приводятся в табл. 2-4 некоторые опытные данные повышения удельных потерь в стали по сравнению с удельными потерями, измеряемыми в аппарате Эпштейна.

Таблица 2-4

Индукция в *гс*	Проценты повышения потерь от			Процент повышения потерь при соединении первичных обмоток			
				в звезду		в треугольник	
	обработки, прессовки и болтов	прессующих деталей	суммарные в воздухе для Y и Δ	в баке	суммарные	в баке	суммарные
10 000	0	1	1	1	2	0	1
11 000	0	2	2	1	3	0	2
12 000	0	2	2	2	4	1	3
13 000	1	2	3	2	5	1	4
14 000	1	2,5	3,5	4,5	8	2,5	6
15 000	2	3	5	13	18	5	10
16 000	3	7	10	20	30	10	20
17 000	5	10	15	—	—	20	35

Данные этой таблицы относятся к наиболее распространенному типу трансформатора — трехфазному с шихтовкой листов согласно фиг. 2-13.

Согласно этим данным, начиная с индукции 15-000 *гс* резко возрастают все добавочные потери. В особенности быстро начинают возрастать потери в баке, значения которых зависят также от того, соединены ли намагничивающие обмотки в звезду или в треугольник. Приведенные в приложении V (лист 2) данные для удельных потерь включают в себя все эти добавочные потери (с учетом бака и схемы соединения в звезду) применительно к стали марки Э4АА. Поэтому эти данные только с большой натяжкой могут считаться удельными потерями в стали, а скорее являются удельными потерями холостого хода, если такой термин был бы приемлем.

Для мощных трансформаторов индукция не берется больше 14 500—15 000 *гс*. Более высокие значения индукции приводят, как только что было указано, к быстрому росту добавочных потерь, а также к быстрому увеличению токов холостого хода (к увеличенному потреблению реактивной мощности станции) и возрастанию высших гармоник тока холостого хода (вредное влияние на линии связи и на изоляцию генераторов и т. п.). Хотя опытным путем было проверено несколько схем компенсации высших гармоник тока холостого хода, однако при этих опытах выявились новые добавочные потери в остовах трансформаторов. Поэтому конструкции с компенсацией высших гармоник тока холостого хода пока еще не получили широкого применения.

Для сухих трансформаторов обычно берется индукция не более 11 000—12 000 *гс*. В этих трансформаторах даже при сравнительно малых мощностях порядка 100 *ква* охлаждение

остова становится очень важной задачей. Эти остовы делаются со специальными вентиляционными каналами для улучшения охлаждения остова.

Иногда приходится производить некоторые специальные магнитные расчеты, например, токов включения, расчет гармоник тока холостого хода и т. п. В этих случаях, пренебрегая петлей гистерезиса, удобнее всего пользоваться кривой первоначального намагничения постоянным током (см. приложение V, лист 1).

2-5. ПРИМЕР РАСЧЕТА ОСТОВА ТРАНСФОРМАТОРА

Возьмем диаметр $D = 340$ *мм*. Этот диаметр, как будет показано в дальнейшем, применяется для трансформаторов мощностью 1 800 *ква*.

Для данного диаметра выбираем сечение с шестью ступенями. Кроме того, ширину ярма берем равной 0,92 от диаметра, т. е. в данном случае $S_6 = 0{,}92$.

Тогда ширина наименьшей ступени C_6 будет равна $C_6 = \sqrt{1 - S_6^2} = 0{,}392$. Для этого значения C_6 по кривым листа 1 приложения IV найдем

$$C_6 = 0{,}392;\; C_5 = 0{,}538;\; C_4 = 0{,}66;\; C_3 = 0{,}798;\; C_2 = 0{,}892;\; C_1 = 0{,}964.$$

Умножая эти косинусы на $\vartheta = 340$ *мм*, получим ширину листов в *мм*

$$C_6 = 133;\; C_5 = 183;\; C_4 = 230;\; C_3 = 271;\; C_2 = 304;\; C_1 = 328,$$

или, округляя и переводя в сантиметры, получим

$$C_6 = 13{,}5;\; C_5 = 18{,}5;\; C_4 = 23;\; C_3 = 27;\; C_2 = 30{,}5;\; C_1 = 33{,}0.$$

Так как $D^2 = 34^2 = 1\,156$ *см*², то, вычитая из этого числа квадраты C_n^2 предыдущей строчки, получим квадраты толщин ступеней

$D^2 =$	1 156	1 156	1 156	1 156	1 156	1 156
$C_n^2 =$	182	342	529	729	930	1 089
$S_n^2 =$	974	814	627	427	226	67

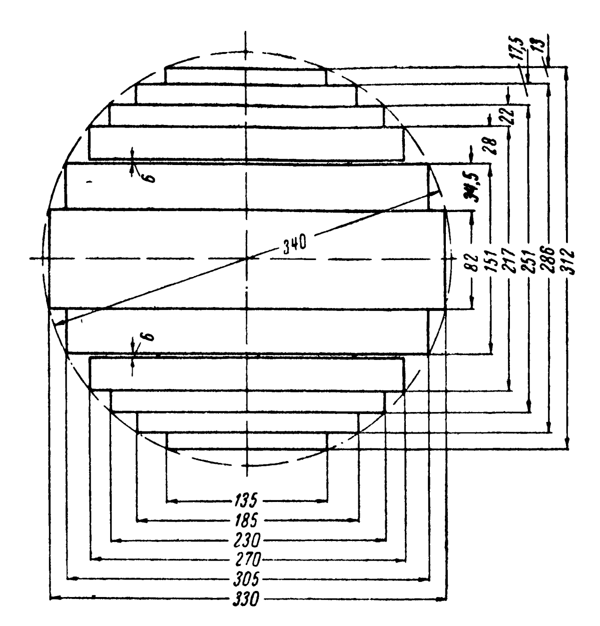
Извлекая квадратный корень из чисел этой строчки, получим толщины ступеней (фиг. 2-15) в *см* и беря последовательные разности толщин стержней, получим толщины каждого пакета в отдельности (в *см*)

$S_n =$	31,21	28,57	25,04	20,66	15,03	8,185
	28,57	25,04	20,66	15,03	8,19	
	2,64	3,53	4,38	5,63	6,84	8,19

Округляя, получим следующие толщины пакетов

2,6	3,5	4,4	5,6	6,9	8,2

Сумма чисел этой строчки равна 31,2 *см*, т. е. достаточно совпадает с ранее найденной толщиной 31,21 *см* пакета ступени $C_6 = 135$ *мм*.



Фиг. 2-15. Шестиступенчатое сечение стержня для $D=340$ *мм*.

В пакете $C_3=270$ *мм* устраиваем каналы толщиной по 6 *мм*. Поэтому толщина этих пакетов уменьшится на $2\cdot 0{,}6=1{,}2$ *см* и вместо 5,6 *см* будет равна 4,4 *см*. Тогда, умножая для каждой ступени ширину пакета на ее толщину, получим сечение

$$\left.\begin{array}{l} 13{,}5\cdot 2{,}6=35{,}1 \\ 18{,}5\cdot 3{,}5=64{,}8 \\ 23\cdot 4{,}4=101{,}2 \\ 27\cdot 4{,}4=118{,}8 \end{array}\right\} 319{,}9\ см^2$$

$$\left.\begin{array}{l} 30{,}5\cdot 6{,}9=211{,}5 \\ 33{,}0\cdot 8{,}2=270{,}0 \end{array}\right\} 481{,}5\ см^2$$

$$\overline{30{,}0}\quad \overline{801{,}4}\ см^2\cdot 0{,}9=721\ см^2$$

Здесь коэффициент 0,9 учитывает толщину лаковой изоляции между листами стали толщиной 0,35 *мм/см*, табл. 2-2.

Коэффициент заполнения сечения стержня получился равным

$$\sigma_{cm}=\frac{721}{\frac{\pi}{4}\,34^2}=0{,}796.$$

Если ярмо выбрать прямоугольного сечения высотою 270 *мм*, то сечение ярма получится равным

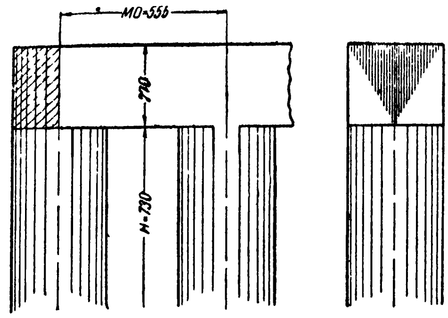
$$27\cdot 30\cdot 0{,}9=729\ см^2,$$

здесь 30 — ширина ярма за вычетом каналов 2×6 *мм*, а 0,9 — коэффициент, учитывающий толщину лаковой изоляции.

Если высота стержня $H=730$ *мм*, а расстояние осей $MO=555$, то вес стали трех стержней равен при $\gamma=7,55$ *кг/дм³*

$$3\cdot7,55\cdot7,30\cdot7,21=1\,195 \text{ кг}.$$

Объем каждого ярма можно представлять состоящим из параллелепипеда, имеющего длину $2MO=1\,110$ *мм* и сечение 729 *см²* (фиг. 2-16) и двух углов (см. заштрихованные части на фиг. 2-16). Эти два угла вместе образуют вертикальную призму, имеющую сечение по форме стержня, т. е. имеют общее сечение 721 *см²*, а высоту 270 *мм*. Тогда вес двух ярем равен



Фиг. 2-16. Угол остова для прямоугольного сечения ярма.

$$2\cdot7,55\cdot1\,110\cdot7,29=1\,222 \text{ кг},$$

$$2\cdot7,55\cdot2,7\cdot7,21=\underline{\quad294 \text{ кг}}$$

$$1\,516 \text{ кг}.$$

Тогда общий вес равен

$$1\,195+1\,516=2\,711 \text{ кг}.$$

Если в стержне индукция $B=14\,500$ *гс*, то в ярме индукция равна

$$14\,500\frac{721}{729}=14\,350 \text{ гс}.$$

В таблице листа 2 приложения V находим, что удельные потери для стали толщиной 0,35 *мм* равны 3,13 и 3,03 *вт/кг*, а удельные намагничивающие мощности 34,8 и 32,2 *ва/кг*. Тогда потери холостого хода P_f будут равны

$$1\,195\cdot3,13=3\,740$$
$$1\,516\cdot3,03=\underline{4\,590}$$
$$8\,330 \text{ вт},$$

а намагничивающая мощность

$$1\,195\cdot34,8=41\,600$$
$$1\,516\cdot30,3=\underline{45\,900}$$
$$87\,500 \text{ ва}$$

Если номинальная мощность трансформатора равна 1 800 *ква*, то ток холостого хода i_0 в процентах равен

$$\frac{87\,500}{1\,800\cdot10}=4,86\%.$$

Если ярмо имеет перевернутое Т-образное сечение, как показано на фиг. 2-17 с высотой 305 для пакетов стержня 330 и 305 *мм* и с высотой 230 для пакетов стержня с шириной листов 270, 230, 185 и 135 *мм*, то сечение ярма будет равно

$$30,5\cdot(8,2+6,9)=461$$
$$23,0\cdot(4,4+4,4+3,5+2,6)=\underline{347}$$
$$808\cdot0,9=726 \text{ см}^2.$$

Тогда вес тех частей ярем, которые находятся между осями стержней равен

$$2\cdot7,55\cdot11,10\cdot7,26=1\,220 \text{ кг}.$$

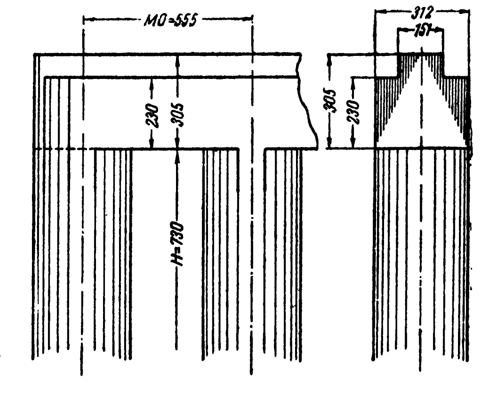
Вес же углов ярма будет слагаться как вес двух призм, имеющих одна сечение 481,5·0,9 = 434 *см²* и высоту 305 *мм*, а другая — сечение 319,9× ×0,9 = 288 *см²* и высоту 230 *мм*, т. е.

$$2 \cdot 7{,}55 \cdot 4{,}34 \cdot 3{,}05 = 200 \text{ кг},$$
$$2 \cdot 7{,}55 \cdot 2{,}88 \cdot 2{,}30 = 100 \text{ кг}$$
$$\overline{300 \text{ кг}}$$

и, следовательно, вес ярма будет равен 1 520 *кг*, вместо 1 516 *кг* по фиг. 2-16. Потери холостого хода и намагничивающая мощность соответственно возрастут приближенно на

$$(1\,520 - 1\,516) \cdot 3{,}03 = 12 \text{ вт},$$

$$(1\,520 - 1\,516) \cdot 30{,}3 = 120 \text{ ва}.$$

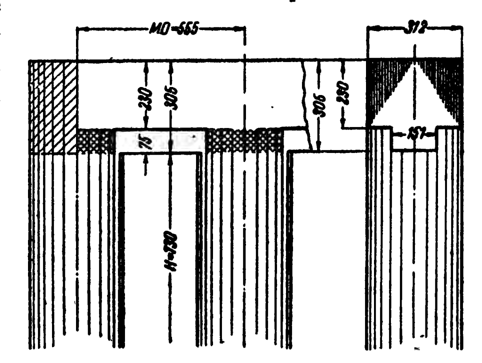


Фиг. 2-17. Угол остова для ступенчатого сечения ярма.

Эта конструкция ярма приводит к тому, что остов становится на 2·(305 — 270) = 70 *мм* выше остова по фиг. 2-16. Зато можно предполагать, что распределение магнитного потока в ярме будет более благоприятным, ибо будет более равномерное изменение сечений пакетов ярма по сравнению с сечениями соответствующих пакетов стержня.

Если же ярмо имеет неперевернутое Т-образное сечение (фиг. 2-18) с высотами 305 и 230 *мм* для тех же пакетов стержня, как и в предыдущем случае (фиг. 2-17), то сечение ярма останется тем же, что и для перевернутого Т-образного сечения, т. е. 726 *см²*. Для подсчета веса ярма объем ярма следует разбить на 3 части. Вес тех частей ярма, которые находятся между осями стержней останется без изменения

$$2 \cdot 7{,}55 \cdot 11{,}10 \cdot 7{,}26 = 1\,220 \text{ кг},$$



Фиг. 2-18. Угол остова для Т-образного сечения ярма.

но к нему надо добавить вес тех частей, которые заштрихованы в клетку на фиг. 2-18. Эти части имеют сечение 288 *см²* и высоту 75 *мм*. Для трех стержней получится, однако, две таких призмы и вес этих призм будет равен:

$$2 \cdot 2 \cdot 7{,}55 \cdot 2{,}88 \cdot 0{,}75 = 65{,}3 \text{ кг}.$$

Вес же углов равен

$$2 \cdot 7{,}55 \cdot 7{,}21 \cdot 3{,}05 = 333 \text{ кг}$$

и, следовательно, общий вес ярем равен

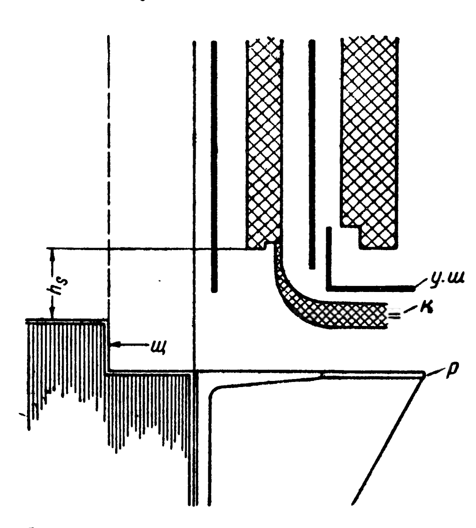
$$1\,220 + 65{,}3 + 333 = 1\,618{,}3 \text{ кг},$$

т. е. на 102,3 *кг* больше, чем в первом случае прямоугольного сечения ярма, и соответственно, увеличатся потери приближенно на

$$102{,}3 \cdot 3{,}03 = 310 \text{ вт}$$

и намагничивающая мощность приближенно на 3 100 *ва*.

Несмотря на явное увеличение веса стали по сравнению с общим весом стали остова при ярме прямоугольного сечения, конструкция ярма с уступом нашла сравнительно большое распространение, так как уступ в сечении ярма позволяет несколько уменьшить изоляционные расстояния от обмотки до ярма и облегчает вывод концов обмоток. На фиг. 2-19 показано поперечное сечение нижней части остова. Полка *р* прессующей ярмо балки установлена на одном уровне с нижним уступом ярма. Благодаря этому вывод конца *k* внутренней обмотки, которая для мощных высоковольтных трансформаторов может иметь рабочее напряжение 6 ÷ 35 *кв*, имеет достаточное изоляционное расстояние как от полки *р*, так и от внешней (110-*кв*) обмотки. Вместе с тем общее изоляционное расстояние h_s может быть уменьшено до минимальных пределов, определяемых пробивным напряжением с обмотки на ярмо. Наиболее опасным местом с точки зрения пробоя, является угол верхнего уступа ярма. Закрытие этого места изоляционным щитком *щ* не столько увеличивает пробивное напряжение, сколько уменьшает разброс пробивных напряжений. Конструкции с уступом ярма и с угловой шайбой [см. фиг. 2-19 «*угл. ш*»] или с несколькими угловыми шайбами позволяет существенно (до 60—70%) уменьшить изоляционные расстояния, применяемые для ярем по фиг. 2-16 и 2-17.



Фиг. 2-19. Вывод конца внутренней катушки в обмотке концентрического типа.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ
ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА
3-1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ВИТКОВ В ОБМОТКАХ

В предыдущих главах было указано, каким образом можно найти основные размеры остова трансформатора, D — диаметр стержней, H — высоту стержней и MO — расстояние между осями стержней (фиг. 1-1). Для выполнения теоретического расчета (см. главы 1 и 2) требуется сравнительно небольшое количество вычислений. Кроме основных размеров трансформатора D, H, MO при помощи теоретического расчета находятся также индукция B и плотность тока δ. Данными, получаемыми при теоретическом расчете, удобно пользоваться при проектировании серий трансформаторов, так как при оценке разных вариантов расчета можно сравнивать данные, характеризующие тот или иной вариант, с данными теоретического расчета.

В тех случаях, когда не придается особого значения небольшим отклонениям стоимости трансформатора от того, или иного минимума стоимости, можно пользоваться указанными в главе 1 приближенными способами для нахождения основных размеров трансформатора или пользоваться справочными кривыми приложения III (листы 1, 2 и 3).

В главе 2 изложены данные, на основании которых можно сделать детальный расчет сечения стержня остова.

Таким образом, если найдены основные размеры остова, сечение сердечника и индукция в остове, то можно приступить к проектированию обмоток и прежде всего к определению числа витков в обмотке. Число витков в трансформаторе определяется по известной формуле для индуктированного напряжения в *в*

$$E = 4{,}44 f n B Q_a \cdot 10^{-8}, \qquad (3\text{-}1)$$

где f — частота в *гц*;
n — число витков;
B — индукция в *гс*;
Q_a — активное сечение стержня в *см*^{2}.

Для $f = 50$ *гц* формула (3-1) упрощается

$$E = 222 n B Q_a \cdot 10^{-8}. \qquad (3\text{-}1а)$$

В некоторых случаях (в формулах для расчета рассеяния, при оценке возможности тонкой регулировки напряжения и т. п.) пользуются понятием „вольт на виток", т. е. отношением значения индуктированного напряжения к числу витков

$$\frac{E}{n} = 222 B Q_a \cdot 10^{-8}. \qquad (3\text{-}1б)$$

По стандарту на силовые трансформаторы ГОСТ 402-41 трансформация первичного напряжения во вторичное указывается при холостом ходе трансформатора. В этом случае индуктированное напряжение можно считать равным фазовым напряжениям первичной и вторичной обмоток, т. е. можно считать, что

$$\left.\begin{aligned} U_{ф1} &= 4{,}44 f n_1 B Q_a \cdot 10^{-8}, \\ U_{ф2} &= 4{,}44 f n_2 B Q_a \cdot 10^{-8}, \end{aligned}\right\} \quad (3\text{-}2)$$

где $U_{ф1}$ — фазовое напряжение первичной обмотки,
$U_{ф2}$ — фазовое напряжение вторичной обмотки при холостом ходе,
n_1 — число витков в первичной обмотке,
n_2 — число витков во вторичной обмотке.

Тогда, очевидно, тождество

$$\frac{U_{ф1}}{n_1} = 4{,}44 f B Q_a \cdot 10^{-8} = \frac{U_{ф2}}{n_2}. \quad (3\text{-}3)$$

Таким образом, по заданным значениям первичных и вторичных фазовых напряжений U_1 и U_2, индукции B, активного сечения стержня Q_a по формуле (3-2) находятся значения n_1 и n_2 чисел витков в первичной и вторичной обмотках.

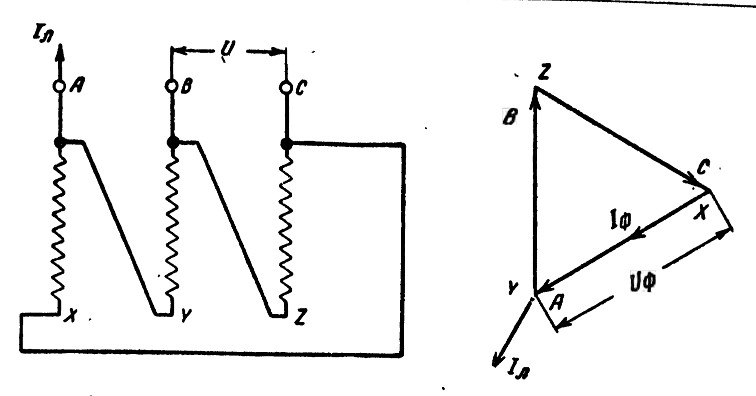
При расчете чисел витков в обмотках следует прежде всего обратить внимание на заданную схему соединения обмоток. При схеме соединения в треугольник (фиг. 3-1) фазное напряжение равно линейному

$$U_ф = U_л, \quad (3\text{-}4а)$$

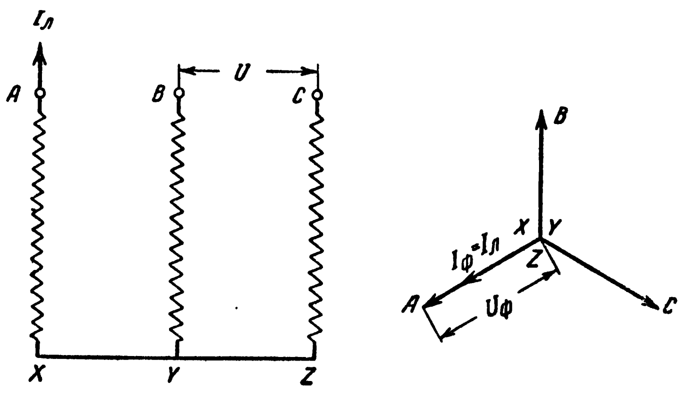
а для схемы соединения в звезду (фиг. 3-2)

$$U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}}. \quad (3\text{-}4б)$$

Для схемы соединения в зигзаг фазовое напряжение $U_ф$ определяется, исходя из значения линейного напряжения $U_л$ по той же формуле (3-4б), что и для схемы звезда. Но так как значение фазового напряжения получается как геометрическая сумма напряжения половин обмоток на разных фазах остова (фиг. 3-3), то напряжение, индуктируемое в каждой половине фазы, например, A_1X_1 и, следовательно, в каждой отдельной части обмотки должно быть больше в $\frac{2}{\sqrt{3}} = 1{,}15$ раза, чем половина фазового напряжения $U_ф$, как это видно из фиг. 3-3, где угол между векторами A_1X_1 и C_2Z_2 равен 120°.



Фиг. 3-1. Схема соединения обмоток в треугольник.



Фиг. 3-2. Схема соединения обмоток в звезду.

Мощность трехфазного трансформатора (в *ква*), независимо от схемы соединения обмоток, как известно, равна

$$P = \sqrt{3} U_л I_л \cdot 10^{-3}. \tag{3-5}$$

Для схемы соединения в треугольник фазный ток равен

$$I_ф = \frac{I_л}{\sqrt{3}}, \tag{3-6а}$$

а для схемы соединения в звезду, или в зигзаг

$$I_ф = I_л. \tag{3-6б}$$

Эти соотношения [формула (3-1б) или (3-3)] между числом витков, напряжениями (3-4а) и (3-4б) и токами (3-6а) и (3-6б) не зависят от того, будет ли данная обмотка первичной, вторичной, третичной или иной какой-либо по счету.

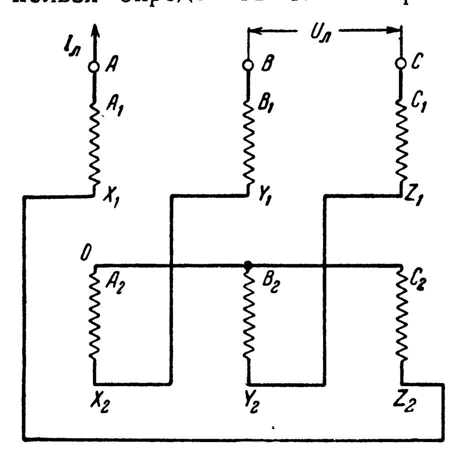
В некоторых случаях коэффициент трансформации задается не при холостом ходе, а при нагрузке и том или ином значении коэффициента мощности $\cos\varphi_2$. В этих случаях нельзя определить также просто [по формуле (3-2)] число витков, как в случае трансформации при холостом ходе, ибо вторичное фазное напряжение $U_{ф2}$, приведенное к числу витков первичного фазного напряжения $U_{ф1}$, будет отличаться от первичного фазного напряжения $U_{ф1}$ на величину падения напряжения $\Delta U_ф$ (фиг. 3-4), т. е.

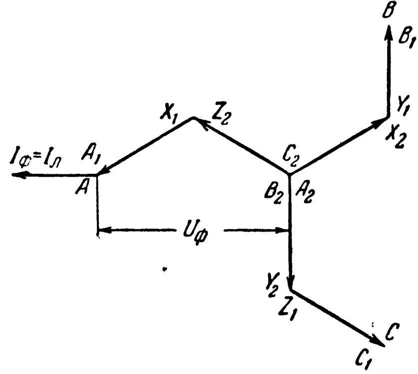
$$U_{ф1}=U'_{ф2}+\Delta U_ф=$$
$$=U_{ф2}\frac{n_1}{n_2}+\Delta U_ф.$$

Значение же $\Delta U_ф$ можно рассчитать, вообще говоря, только после того, как сделан полный расчет обмотки. Чтобы обойти это затруднение, рекомендуется предварительно приближенно оценить разность

$$|U_{ф1}|-|U'_{ф2}|$$

и внести соответствующую поправку, увеличив число витков во вторичной обмотке, рассчитанное по формуле для холостого хода [формула (3-3)] на величину,





Фиг. 3-3. Схема соединения обмоток зигзаг.

$$n_2\frac{|U_{ф1}|-|U'_{ф2}|}{U'_{ф2}}.$$

Если после того, как проведен полный расчет обмотки, падение напряжения $\Delta U_ф$ будет отличаться от предварительно выбранного, то необходима вторая поправка в числе витков вторичной обмотки. Эта поправка либо весьма просто может быть внесена в весь расчет, либо ею можно будет

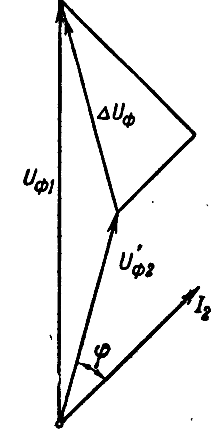
пренебречь, если эта поправка не превышает допуска на коэффициент трансформации

$$\frac{U_1}{U_2}. \qquad (3\text{-}7)$$

Для силовых трансформаторов допуск на коэффициент трансформации составляет 0,5%. Для специальных маловитковых трансформаторов (например, электропечных трансформаторов) этот допуск повышается до 2—2,5%.

3-2. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБМОТОК И КАТУШЕК

К обмоткам трансформаторов предъявляется много разнообразных требований. Обмотки трансформатора должны быть так размещены в окне остова, чтобы они были надежно изолированы друг от друга и от остова трансформатора. Изоляция же отдельных элементов обмотки между собой и от остова должна обеспечить надежную эксплоатацию трансформатора не только в нормальных условиях, но при разного рода перенапряжениях.



Фиг. 3-4. Диаграмма падений напряжения.

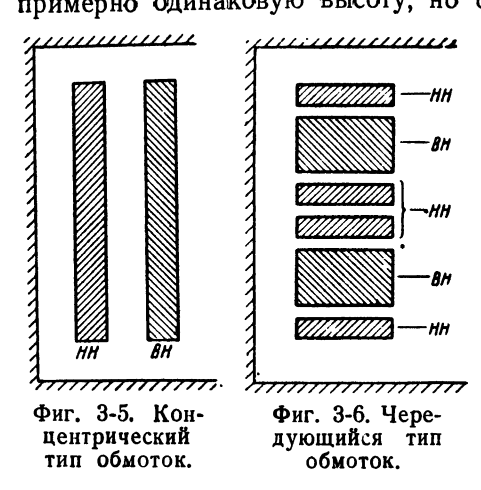
Кроме того, потери в обмотках и их реактивное сопротивление должны соответствовать предписанным значениям. От обмотки должны быть выведены предписанные стандартом отпайки для регулировки напряжения. Конструкция обмоток должна быть механически прочна и выдерживать ударные нагрузки при коротких замыканиях. Потери в обмотках не должны чрезмерно нагревать обмотки при длительной работе трансформатора. Наконец, необходимо учесть условия производства катушек — намотки, сушки, пропитки, прессовки, транспортировки и т. п.

Для всех этих условий нельзя составить системы уравнений и потому пока не удалось найти какое-либо теоретическое решение задачи о размещении обмотки в окне остова наподобие решения задачи об определении основных размеров трансформатора. Поэтому проектирование обмотки ведется таким образом, что сначала выбираются типы обмоток, устанавливаются основные изоляционные расстояния, производится размещение витков в катушках, а потом подсчитываются вес проводов, потери, напряжение рассеяния, добавочные потери, механические усилия, тепловые нагрузки и температура обмоток. Очевидно, что нельзя просто найти такое размещение витков, которое удовлетворяло бы сразу всем поставлен-

ным условиям. Поэтому размеры обмотки приходится несколько раз подправлять и переделывать, пока не получатся приемлемые результаты.

Различают 2 основных типа обмоток — концентрические обмотки (фиг. 3-5) и чередующие обмотки (фиг. 3-6).

Концентрический тип обмоток характеризуется тем, что обмотки высшего и низшего напряжений (ВН и НН) имеют примерно одинаковую высоту, но обмотка высшего напряжения имеет больший диаметр, а обмотка низшего напряжения имеет меньший диаметр и расположена вблизи стержня.



Фиг. 3-5. Концентрический тип обмоток.

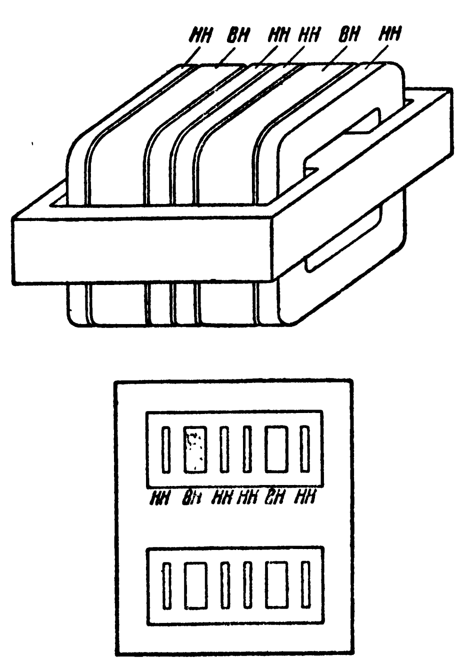
Фиг. 3-6. Чередующийся тип обмоток.

Катушки высшего и низшего напряжений чередующихся обмоток имеют равные или примерно равные диаметры (фиг. 3-6), но зато по высоте стержня катушки высшего напряжения чередуются с катушками низшего напряжения.

При проектировании обмоток того или иного типа особое внимание должно быть обращено на симметричное расположение катушек высшего напряжения по отношению к катушкам низшего напряжения или, лучше сказать, распределение тока в витках первичных катушек по отношению к распределению во вторичных. При этом безразлично, будет ли первичное напряжение высшим или низшим. Как показывает опыт расчета и испытания трансформаторов, большинство отступлений от этого правила приводят всегда к разного рода ухудшениям технических данных трансформатора, в некоторых случаях совершенно неприемлемых.

В настоящее время концентрический тип обмоток имеет преобладающее значение. Обмотки чередующего типа применяются, главным образом, для некоторых типов специальных трансформаторов. Так, трансформаторы для электропечей чаще всего делаются чередующегося типа, так как в этих трансформаторах бывает небольшое число витков в обмотке низшего напряжения (от 1 до примерно 20). Большое значение тока (несколько тысяч ампер) в обмотке низшего напряжения этих трансформаторов заставляет обмотку подразделять на несколько параллельных ветвей, которые необходимо чередовать с катушками высшего напряжения.

Чередующийся тип обмоток применяется в основном у трансформаторов броневого типа. На фиг. 3-7 показан общий вид однофазного броневого трансформатора в перспективе и в плане. Силовые трансформаторы броневого типа изготовляются лишь ограниченным числом иностранных фирм. У трансформаторов броневого типа обмотки надеваются на средний сердечник и так как высота окна обычно мало отличается по размерам от ширины окна, то чередующийся тип обмотки является наиболее целесообразным для данного типа остова. У трехфазных трансформаторов броневого типа (фиг. 3-8) направление намотки обмоток средней фазы делается обратного направления, чем направление намоток крайних фаз, для того, чтобы уменьшить значение результирующих потоков Φ_x в перемычках между фазами. В этом случае значения результирующих потоков Φ_x во всех перемычках ярм будут равны половине потока сердечника.



Фиг. 3-7. Трансформатор броневого типа.

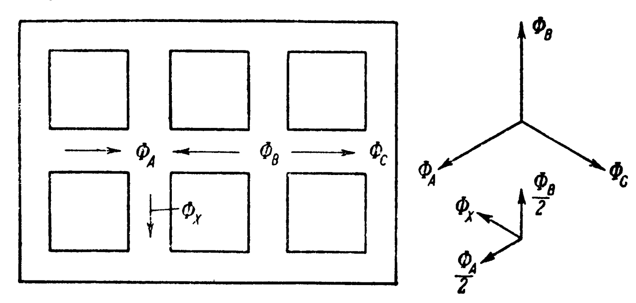
Трансформаторы стержневого типа с обмотками концентрического типа могут иметь разнообразные типы катушек. Так, различают:

1) цилиндрические катушки,
2) секционные катушки (нескольких видов),
3) слоевые катушки,
4) непрерывные катушки,
5) спиральные катушки (простые, двойные и т. п.),
6) дисковые катушки.

Для трансформаторов с обмотками чередующегося типа применяются, главным образом, дисковые катушки или дисковые и спиральные катушки.

У трансформаторов стержневого типа на выбор того или иного типа обмотки влияет прежде всего значение тока и, следовательно, сечение провода. Однако, для ряда значений тока можно применять разные типы обмоток, например, цилиндри-

ческие катушки, или спиральные. Тогда выбор типа катушки происходит уже на основании производственных возможностей или технических особенностей каждого типа катушек. Так, например, цилиндрические катушки имеют наибольшую поверхность, соприкасающуюся с охлаждающей средой, и потому интенсивно охлаждаются. Но эти катушки в механическом отношении слабее, чем непрерывные или спиральные. Зато добавочные потери от вихревых токов при спиральных катушках могут получить очень большое значение. Для уменьшения



Фиг. 3-8. Направление потоков в остове броневого типа.

этих добавочных потерь приходится в спиральных катушках устраивать транспозиции проводов, что приводит к некоторой потере места в окне трансформатора.

В приводимых ниже примерах расчета выбор типа обмоток сделан применительно к установившейся в настоящее время практике.

В следующем параграфе дано краткое описание каждого типа обмоток.

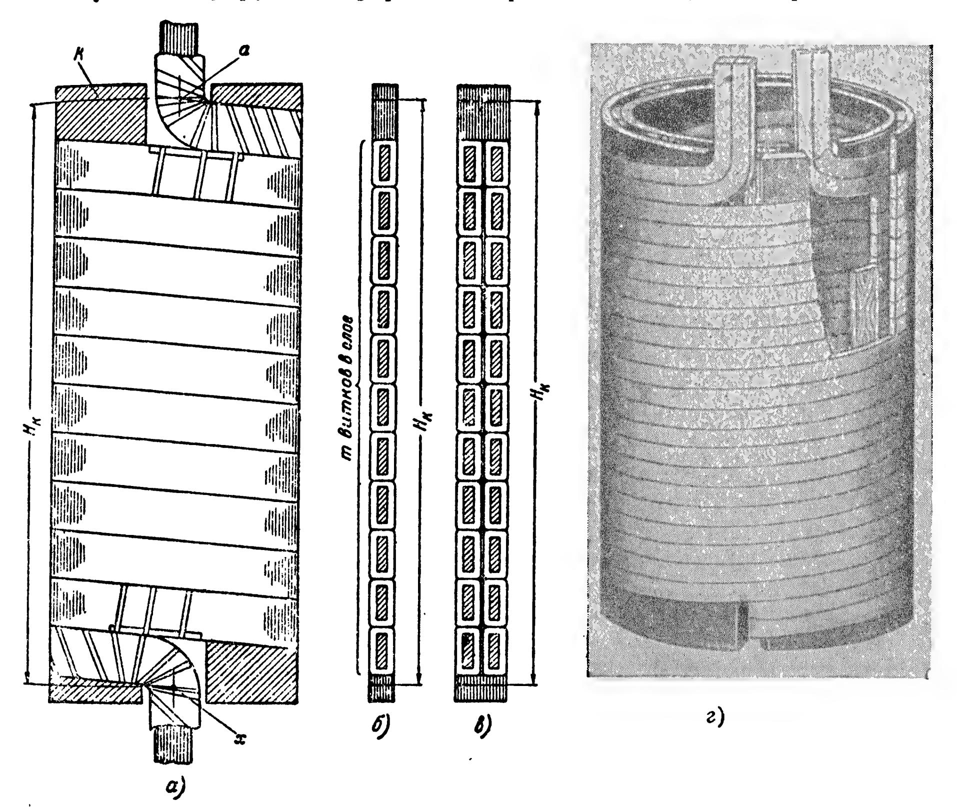
Необходимые сведения о проводах круглого и прямоугольного сечения даны в приложении VI. В приложении VII даны необходимые сведения по внутренней (междуслоевой, межсекционной) изоляции катушек. Сведения, касающиеся внешней, или, как иначе называют, главной изоляции катушек, т. е. сведения относительно изоляционных расстояний катушек разных обмоток друг от друга и от заземленных деталей даны также в приложении VII. В том же приложении даны некоторые сведения о наиболее часто применяемых изоляционных материалах. Очевидно, что данные этих справочных таблиц имеют относительную ценность, т. е. пока не внедрены более совершенные виды изоляции, взамен волокнистых веществ и трансформаторного масла.

3-3. ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ КАТУШКИ

Цилиндрическая катушка представляет собой цилиндрическую спираль, витки которой из провода прямоугольного се-

чения, плотно прилегают друг к другу (фиг. 3-9,*а*). Цилиндрические катушки мотаются как однослойные или как двухслойные (фиг. 3-9,*б*, *в* и *г*).

Обычно стараются избегать применения однослойных цилиндрических катушек, так как при намотке этих катушек получаются упругие деформации провода, и катушка стремится

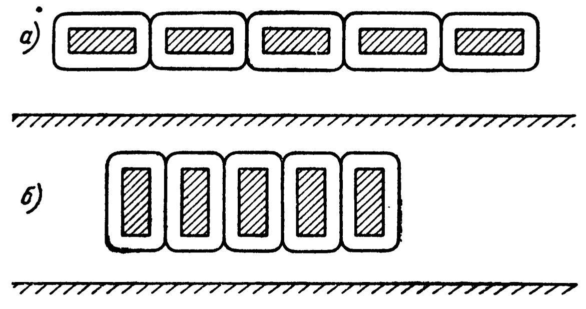


Фиг. 3-9. Цилиндрическая катушка.

раскрутиться, из-за чего крайние витки недостаточно плотно прилегают друг к другу. У двухслойных катушек это раскручивание значительно слабее, ибо переход из одного слоя в другой препятствует раскручиванию верхнего и нижнего слоев.

Если провод прямоугольного сечения укладывается так, что большая сторона сечения провода оказывается параллельной оси цилиндра (фиг. 3-9,*а*), то говорят, что провод намотан «плашмя» (см. также фиг. 3-10,*а*). Если же меньшая сторона сечения провода оказывается параллельной оси цилиндра, то говорят, что провод намотан «на ребро» (фиг. 3-10,*б*).

В тех случаях, когда сечение провода для заданных значений тока и плотности тока оказывается больше, чем значения, указанные в приложении VI (листы 1 и 2) или, когда размер одного витка в направлении оси цилиндра (осевой размер) оказывается больше, чем наибольший размер стороны прямоугольного сечения, указанной в таблице приложения VI (лист 2), то применяются параллельные провода, т. е. каждый электрический виток состоит из нескольких проводов, соеди-



Фиг. 3-10. Типы намоток.
а — плашмя; *б* – на ребро.

няемых на концах катушки в параллель. Обычно применяется не более 4—5 проводов в параллель.

Двухслойные катушки изготавливаются либо с бумажной или электрокартонной изоляцией *s* между слоями фиг. 3-11,*а*, либо между слоями делается масляный канал *k* фиг. 3-11,*б*.

Масляный канал получается благодаря установке при намотке прокладок *p* (фиг. 3-11,*б*). Для того чтобы канал между слоями был достаточно эффективен с точки зрения отвода тепла от катушек, рекомендуется каналы делать не менее

для масляных трансформаторов

$k = 5—6$ *мм* длиной не более 300 *мм*,
$k = 7—8$ *мм* длиной от 300 до 500—600 *мм*,
$k = 10—12$ *мм* для канала длиною более 600 *мм*,

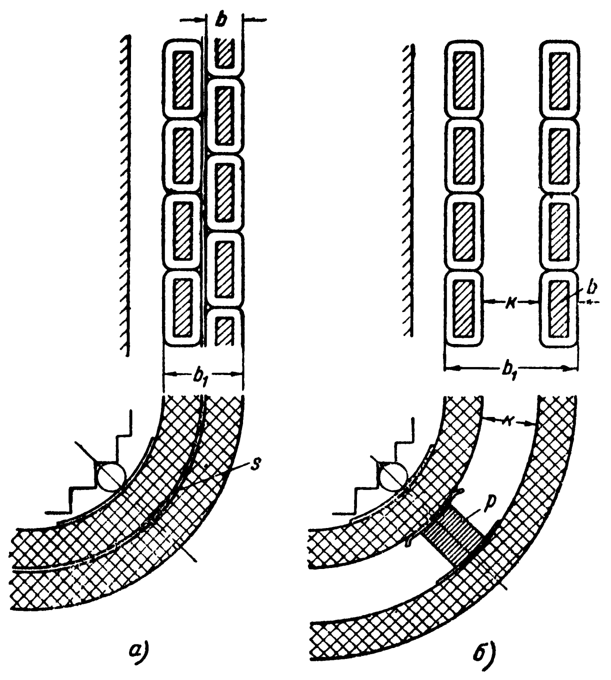
для сухих трансформаторов

$k = 8—10$ *мм* длиной не более 200 *мм*,
$k = 10—12$ *мм* длиной не более 400 *мм*,
$k = 12—15$ *мм* длиной не более 600 *мм*

Подробнее см. главу о тепловом расчете трансформатора.

Крайние витки катушки, как идущие по винтовой линии, лежат в плоскости, наклоненной к оси под некоторым углом, т. е. у катушки получаются косые торцы. Для того, чтобы катушка стояла вертикально на горизонтальной плоскости, к

последним виткам каждого слоя приматываются изоляционные кольцевые клинья (*k* фиг. 3-9,*а*) из гетинакса или из полос толстого электрокартона. Толщина кольцевого клина берется приблизительно равной радиальной ширине каждого слоя. Выбор высоты клина вообще говоря, зависит от выбранного размера изоляционного расстояния от обмотки до ярма и от



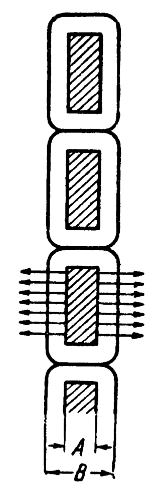
Фиг. 3-11. Двухслойная цилиндрическая катушка.

шага витка. Но во всяком случае наиболее узкая часть клина берется не меньше 5 *мм*. На фиг. 3-12 показано, что размеры y_1 и y_2 обоих клиньев должны быть выбраны так, чтобы обеспечить достаточное удаление конца *a* от витков внешнего слоя катушки. Вместе с тем конец *a* должен быть достаточно удален от плоскости *p* опоры, на которой стоит катушка. Концевые клинья одновременно защищают изоляцию концевых витков при транспорте катушек в процессе производства.

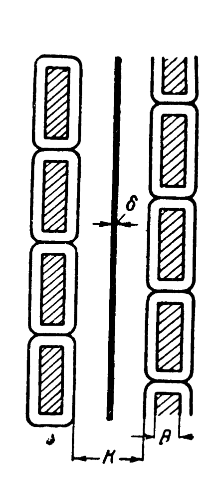
Особое внимание должно быть обращено на механическую прочность обмотки и прежде всего на плотное прилегание витков друг к другу. Бандажи из хлопчатобумажной ленты, стягивающие катушки в осевом направлении, недостаточно надежны, ибо после сушки и пропитки лаком эти бандажи становятся хрупкими. Поэтому обращается большое внимание на

склеивающие свойства пропиточных лаков, бандажи же применяются как временная мера, необходимая при перевозке катушек до их пропитки. Потом эти бандажи срезают. При всех перевозках, перегрузках, насадках на сердечник, а также под действием толчков тока в эксплоатации наиболее часто повреждаются концевые витки. Поэтому в месте выхода концов из катушки накладывается на провода дополнительная изоляция из электрокартона в виде коробочек (см. фиг. 3-9,*а*).

Фиг. 3-12. Расположение концов у цилиндрической катушки.



Фиг. 3-13. Направление тепловых потоков от однослойной цилиндрической катушки.



Фиг. 3-14. Двухслойная цилиндрическая катушка с масляным каналом и барьером в канале.

Чаще всего применяются двухслойные катушки, намотанные плашмя. Вся катушка опирается на узкую сторону сечения провода, создавая при сильных толчках тока в эксплоатации большую нагрузку на изоляцию провода. Сам провод выглядит как-то неустойчивым по сравнению со всей высотой обмотки. Поэтому там, где это представляется возможным, стремятся либо применять другие более устойчивые в механическом отношении типы обмоток, либо получить особую монолитность катушек за счет склеивающей, или, лучше сказать, цементирующей способности разных высыхающих замазок. В этом отношении замазка, состоящая из цинковых белил и льняного масла, оказалась весьма прочной даже после многолетней работы в трансформаторном масле.

С другой стороны, легко видеть, что цилиндрические однослойные катушки, намотанные плашмя лучше всего охлаждаются — каждый провод отдает тепло охлаждающей среде с поверхности наибольшей стороны сечения провода (фиг. 3-13).

Радиальный размер B (фиг. 3-14) голого провода для двухслойных цилиндрических катушек берется не больше 5—5,5 *мм* с тем, чтобы добавочные потери от вихревых токов не превысили 10%. Больший процент добавочных потерь говорил бы о недостаточно рациональном использовании активных материалов, в данном случае меди.

Цилиндрические катушки чаще всего применяются для обмоток низшего напряжения (до 500 *в*) масляных трансформаторов от 5 до 560—1 000 *ква*. Значительно реже цилиндрические катушки применяются для высоковольтных обмоток на 6 000 и 10 000 *в* для трансформаторов от 560 *ква* и выше. Цилиндрические катушки широко применяют для обмоток силовых сухих трансформаторов как для низших напряжений, так и для высших напряжений порядка 6 000 и 10 000 *в*.

Подсчет размеров цилиндрических катушек

Если m число витков в слое (для случая, показанного на фиг. 3-9 $m=11$), то осевой размер $H_к$ (расстояние между точками a и x) равно

$$H_к=(m+1)\,ap, \tag{3-8}$$

где a — размер в осевом направлении провода с изоляцией;
p — число параллельных проводов в одном электрическом витке.

Обычно размер $H_к$ округляется до ближайшего большего круглого числа, оканчивающегося на 5 или 0. Тем самым дается допуск порядка 1—2% на неточности изготовления.

Радиальный размер b_1 двухслойной катушки (фиг. 3-11,*а*) равен

$$b_1=2b+s, \tag{3-9}$$

где b — размер в радиальном направлении провода с изоляцией, а s — толщина междуслойной изоляции (все размеры в *мм*). Этот размер округляется до целого или половины *мм*, а, кроме того, еще набрасывается 0,5, учитывающие толщину ленты бандажей и неточность производства.

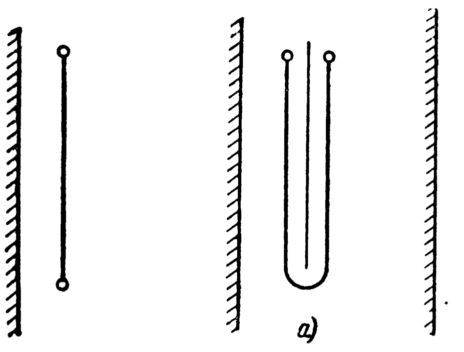
Если для охлаждения катушки между слоями делается канал (фиг. 3-11,*б*), то радиальный размер b_1 подсчитывается аналогично

$$b_1=2b+k$$

и делаются те же накидки и округления.

Ширина каналов k в зависимости от высоты обмотки и типа трансформатора (сухой или масляный) была уже указана несколько ранее.

В качестве междуслойной изоляции применяется обычно кабельная бумага толщиной 0,06 или 0,12 *мм*, а для проводов большого сечения — толщиной 0,5 *мм*. Имея в виду, что в процессе намотки междуслойная бумажная изоляция может случайно порваться и этот дефект может остаться незамеченным, предпочитают вместо одного слоя бумаги 0,12 класть 2 слоя бумаги 0,06. Кроме того, бумага 0,06, как более мягкая, лучше



Фиг. 3-15. Условное обозначение однослойной цилиндрической катушки.

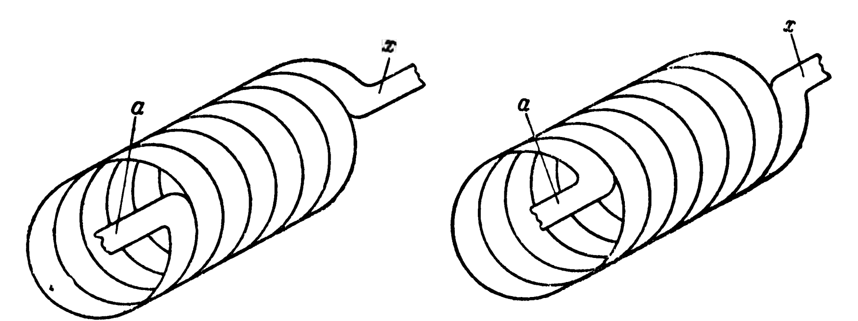
Фиг. 3-16. То же двухслойной.

заполняет неровности между витками и тем самым препятствует их сползанию, т. е. обеспечивает лучшую механическую прочность катушки в процессе изготовления и при транспортировке в производстве.

При рабочем напряжении между слоями не более 500 *в* берется междуслойная изоляция толщиною 0,12 *мм* или 2 · 0,06 *мм* для сухих или масляных трансформаторов. Цилиндрические катушки на рабочее напряжение 3 или 6 *кв* изготавливаются весьма редко. В этом случае рекомендуется канал k (фиг. 3-11,*б*) разделить на две части цилиндром из бакелита или электрокартона (фиг. 3-14). Толщина цилиндра и размеры суммарных масляных каналов выбираются такими же, как и между обмотками высшего и низшего напряжений на соответствующее рабочее напряжение.

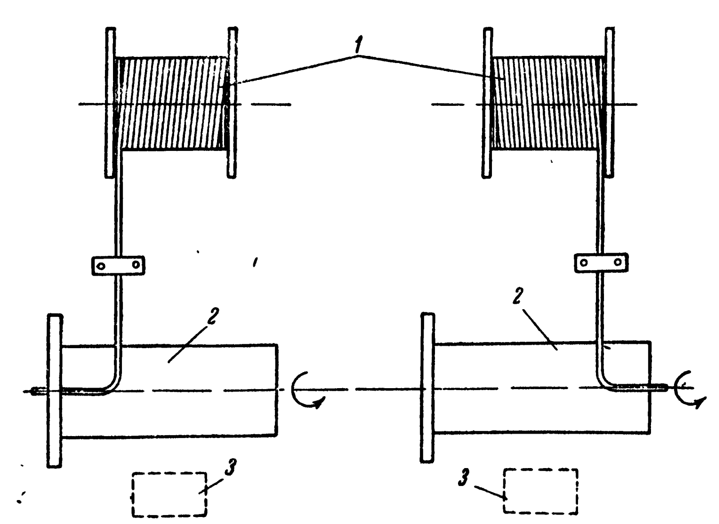
Как указывалось выше (фиг. 3-11,*б*), канал между слоями получается путем установки вертикальных реек. Обычно эти рейки устанавливаются через каждые 120—150 *мм* по дуге катушки или, грубо говоря, на каждые 80—100 *мм* диаметра катушки необходимо ставить две рейки. Обычно берется четное число реек. Ширина реек — 15 *мм*.

На фиг. 3-15 показаны условные обозначения однослойной цилиндрической катушки. Фиг. 3-16,*а* дает условное обозначение двухслойной катушки с междуслойной твердой изоляцией, а фиг. 3-16,*б* — с масляным каналом.



Фиг. 3-17. „Правая" однослойная цилиндрическая катушка.

Фиг. 3-18. „Левая" однослойная цилиндрическая катушка.



Фиг. 3-19. Схемы намотки „правых" и „левых" цилиндрических катушек.

1 — барабан с проводом; *2* — шаблон; *3* — место обмотчика.

Цилиндрические катушки могут быть намотаны двояко: либо по часовой стрелке—иначе «*правая намотка*» (фиг. 3-17), либо против часовой стрелки — «*левая намотка*» (фиг. 3-18). На фиг. 3-19 показано, что как правая, так и левая намотки могут быть получены без изменения вращения намоточного станка. Если барабан с проводом *1* располагать перед намо-

точным станком, а шаблон *2* на станке вращается на обмотчика *3*, то левая намотка получается, если начало катушки закрепить на левой стороне шаблона, а правая намотка получится, если начало катушки закрепить на правой стороне шаблона.

Если однослойную катушку перевернуть и смотреть на нее со стороны конца *x* (фиг. 3-17 и 3-18), то правая катушка останется правой, а левая — левой. Если необходимо, чтобы правая катушка действовала бы как левая, надо, не меняя положения катушки на сердечнике, поменять начало и конец, т. е. ток подводить не к точке *a* (фиг. 3-17 и 3-18), а к точке *x*.

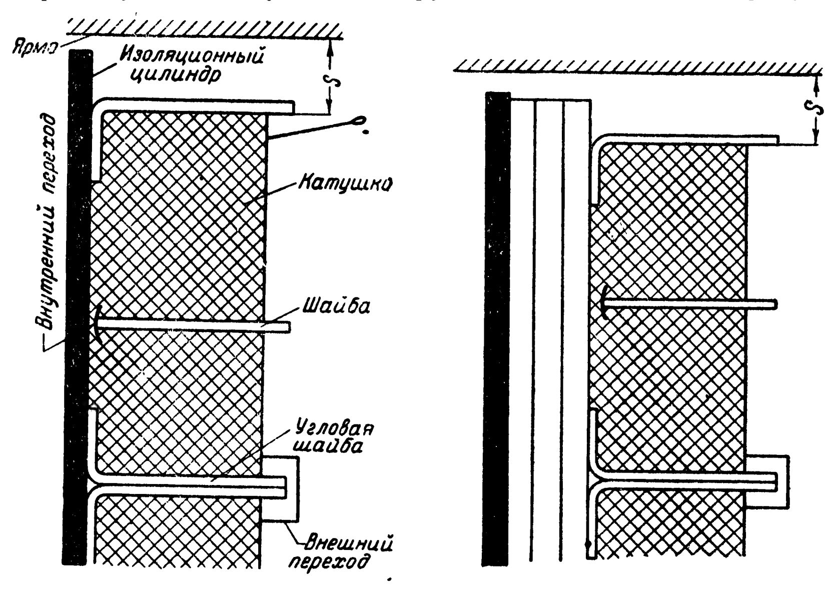
У двойных катушек первый и второй слои оказываются всегда разнонамотанными. Условно считают направлением намотки двойной катушки направление намотки внутреннего слоя, т. е. началом катушки (точка *a*) считается начало внутреннего слоя. Так же, как и для однослойных катушек подвод тока не к началу, а к концу катушки приводит к изменению направления намотки катушки.

3-4. СЕКЦИОННЫЕ КАТУШКИ

Секционные катушки мотаются из проводов круглого сечения. Секционные катушки наматываются либо непосредственно на изоляционные цилиндры (фиг. 3-20), либо между изоляционным цилиндром и катушками делается вертикальный канал (фиг. 3-21). Иногда в последнем случае вместо изоляционных шайб между катушками прокладываются горизонтальные прокладки (фиг. 3-22), покрывающие лишь небольшую часть поверхности обмотки, так что образуются горизонтальные масляные каналы между катушками. Обычно эти прокладки с одной стороны имеют просечку (фиг. 3-23), в которую входит уширенная часть вертикальной рейки. Таким образом, оказывается, что горизонтальные прокладки нанизаны на вертикальную рейку. Ширина вертикальных реек обычно берется равной 15 *мм*. Число клиньев и ширина горизонтальных прокладок определяются по данным теплового и механического расчетов. Однако, на основании ряда произведенных расчетов можно указать, что расстояние между осями горизонтальных прокладок берется порядка 120 *мм*, что приводит к грубому правилу — необходимо на каждые 80 *мм* по среднему диаметру ставить 2 прокладки. Число прокладок всегда берется четным. Наиболее распространенная ширина горизонтальных прокладок равна 30 *мм*.

Секционная катушка имеет всегда одно начало на внутренней поверхности катушки и один конец на внешней поверхности катушки. Обычно избегают соединять начало одной катушки (внутренний конец) с концом другой катушки (с на-

ружным концом), так как этот соединительный провод должен был бы итти в радиальном направлении мимо всей катушки. В этом случае для достижения надежной изоляции этого соединительного провода от обеих катушек пришлось бы увеличить канал между катушками. Для того, чтобы получить наиболее простое соединение концов, две соседних катушки мотают в разных направлениях, одна катушка имеет, например, левую намотку, тогда другая катушка имеет правую



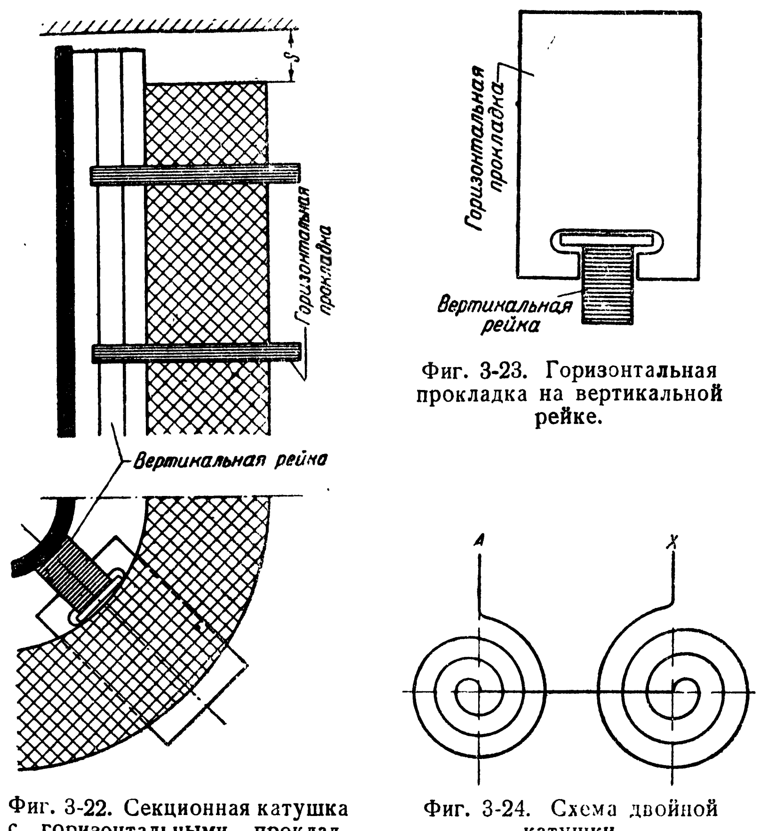
Фиг. 3-20. Секционная катушка на цилиндре.

Фиг. 3-21. Секционная катушка с рейками на цилиндре.

намотку. Это схематически изображено на фиг. 3-24, где слева катушка A имеет левую намотку, внутренний конец которой соединен с внутренним концом катушки X, имеющей правую намотку. Тогда, если итти от конца A, вращение тока будет по часовой стрелке, как в той, так и в другой катушке. Таким образом, получается соединение катушек, показанное на фиг. 3-25. Внутренние переходы (фиг. 3-25) выполняются при намотке катушек или перед насадкой на цилиндр, внешние переходы делаются обычно тогда, когда изоляционные цилиндры с катушками надеты (собраны) на стержни остова трансформатора. Чередование катушек с левой и с правой намоткой обязательно также и для секционных катушек, показанных на (фиг. 3-20 и 3-21). Для катушек, наматываемых непосредственно на цилиндр (фиг. 3-20) сперва наматываются все левые катушки, внутренние концы которых пропущены

сквозь шайбы, отделяющие левые катушки от правых. Потом к этим внутренним концам припаивается провод, идущий из бухты и мотаются все правые катушки.

Угловые шайбы, показанные на фиг. 3-20 и 3-21, служат для создания достаточного пути поверхностного разряда в тех



Фиг. 3-22. Секционная катушка с горизонтальными прокладками.

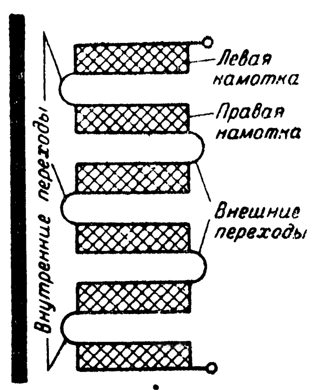
Фиг. 3-23. Горизонтальная прокладка на вертикальной рейке.

Фиг. 3-24. Схема двойной катушки.

местах, где между соседними катушками будет наибольшее напряжение. На самом деле в местах, прилегающих к простой шайбе у изоляционного цилиндра, будут расположены витки, имеющие равные или близкие потенциалы, так как эти витки соединяются внутренним переходом. Равным образом близкие потенциалы будут иметь витки, лежащие непосредственно по обе стороны от внешних переходов. По мере удаления от этих переходов все больше и больше будет становиться разность потенциалов тех витков, которые лежат по одну и другую сторону от шайб. У внешних краев катушки необходимая изоляция таких витков достигается путем выступа шайбы за

поверхность катушки. У внутренних поверхностей достаточное изоляционное расстояние создается отворотами угловых шайб.

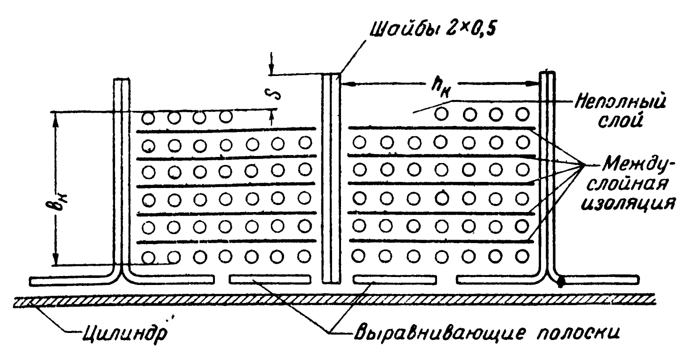
Отвороты угловых шайб также увеличивают путь поверхностного разряда с катушки на ярмо или на другую обмотку. Поэтому изоляционное расстояние от катушек на фиг. 3-20 и 3-21 до ярма можно было бы сделать меньше по сравнению с изоляционным расстоянием до ярма от катушки по фиг. 3-22 для одинаковых рабочих напряжений. В секционных катушках, которые мотаются из круглого провода, отвороты угловых шайб делаются не больше 8—10 *мм*. Эти отвороты получают путем вытяжки электрокартона толщиной 0,5—1 *мм* на горячем прессе. Так как обычно требуются угловые шайбы с различными диаметрами для трансформаторов разных мощностей, то применялись обычно дешевые прессформы, выточенные из дерева (пуансон и матрица), а подогрев электрокартона получался таким образом, что перед штамповкой отворота весь внутренний край шайбы смазывался спиртом и поджигался; сейчас же давил пуансон и тушил спирт, вытягивая одновременно борт отворота.



Фиг. 3-25. Дисковые катушки.

Секционные катушки широко применялись раньше для обмоток высшего напряжения, т. е. от 1 000 *в* и выше. Для напряжений 110 *кв* секционные катушки можно встретить лишь для устарелых конструкций трансформаторов мощностью 2 000—3 000 *ква*. Как известно, неизбежные в эксплоатации перенапряжения заставляют усиливать изоляцию катушек и витков, прилегающих к началу или к концу обмотки фазы. Поэтому при рассмотрении внутреннего строения секционных катушек следует обращать внимание на строение концевых (входных) и остальных (главных) катушек. Кроме того, в тех случаях, когда это позволяет наличие оборудования для дополнительной изолировки провода, предпочитают итти на усиление изоляции проводов даже в главных катушках обмоток на 35 *кв* и выше рабочего напряжения.

Обычно число секционных катушек выбирается так, чтобы на одну секционную катушку пришлось бы не более 800—1 000 *в*. В табл. 3-1 приведены некоторые данные для наиболее характерных исполнений секционных катушек (см. также фиг. 3-26).



Фиг. 3-26. Схема секционной катушки.

Таблица 3-1

Рабочее напряжение в *кв*	до 6,0	11	15	20	30—44	55—110
Главные катушки						
Изоляция проводов на обе стороны в *мм*	Нормальная (0,3÷0,4)				Усиленная 0,6÷0,8	Усиленная 1,5
Изоляция между слоями при напряжении на слой	До 160 *в* . . . . 1 слой бумаги 0,06 *мм* До 250 „ . . . . 2 слоя бумаги 0,06 *мм* До 350 „ . . . . 2 слоя бумаги 0,12 *мм*					
Входные катушки						
Усиленная изоляция между слоями	Без входных катушек	Для 1% витков электрокартон 2×0,2 *мм* Для 2—3% витков электрокартон 1×0,2 *мм*			Для 1% витков электрокартон 3×0,2 *мм* Для 2% витков электрокартон 2×0,2 *мм* Для 3% витков электрокартон 1×0,2 *мм*	
Емкостное кольцо	Без емкостных колец					Емкостное кольцо

Осевой размер $h_к$ секционной катушки подсчитывается по формуле, аналогичной формуле (3-8), только в скобках стоит не $(m+1)$, а $(m+0{,}8)$

$$h_к = (m + 0{,}8)\,d, \qquad (3\text{-}10)$$

здесь d — диаметр изолированного провода в *мм*;
m — число витков в слое (фиг. 3-26),

Коэффициент 0,8 [вместо 1 в формуле (3-8)] введен для того, чтобы переходы из одного слоя в другой не оказывались бы друг над другом для всех слоев, а были бы смещены по окружности. Каждый переход провода с нижнего на верхний

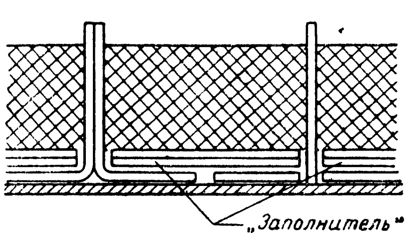
вызывает всегда некоторое местное утолщение. Для того, чтобы при таком смещении переходов быть уверенным, что все витки разместятся в катушке, рекомендуется последний слой (верхний) делать неполным (фиг. 3-26), примерно наполовину.

Радиальный размер $b_к$ подсчитывается, как сумма размеров изолированных проводов диаметром d *мм* и междуслойной изоляции s *мм*

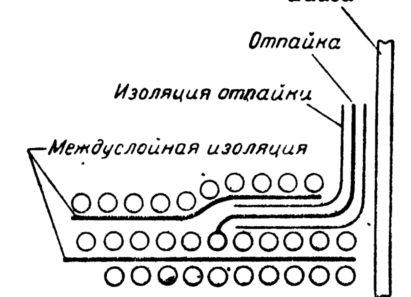
$$b_к = nd + (n-1)s, \qquad (3\text{-}11)$$

где n — число слоев.

Счет числа слоев и витков в катушке (например, для вывода отпаек) ведется в той последовательности, в которой витки и слои наматываются на цилиндр или шаблон. Полученный по формуле (3-11) размер $b_к$ округляется до ближайшего большего целого или половины миллиметра.



Фиг. 3-27. Детали секции с заполнителем.



Фиг. 3-28. Вывод отпаек от секционной катушки.

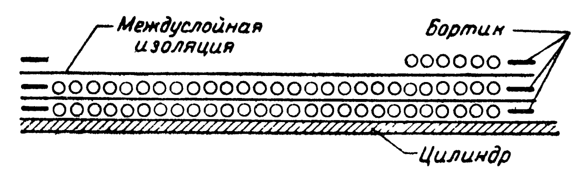
При подсчете диаметров катушек (следовательно, веса проводов) не следует забывать, что отворот угловой шайбы и выравнивающие полоски (фиг. 3-26) увеличивают внутренний диаметр на $2 \times 2 = 4$ *мм*. Если выравнивающие полоски не ставятся, то все равно над отворотом угловой шайбы катушка будет иметь некоторое утолщение. В некоторых случаях внутренний диаметр катушек (для увеличения напряжения рассеяния) увеличивается путем дополнительной намотки «заполнителей» (фиг. 3-27).

На фиг. 3-28 показано выполнение отпайки от какого-то промежуточного витка. Отпайка делается из гибкой медной ленточки толщиной 0,2—0,3 *мм*, припаиваемой к проводу. Эта ленточка, изолированная лакотканью и электрокартонными полосками, прокладывается сперва вдоль своего слоя, а потом вдоль ближайшей шайбы. Это выполнение отпайки не препятствует дальнейшей намотке следующих слоев, а вызываемое этой отпайкой местное утолщение существенного значения обычно не имеет.

3-5. СЛОЕВЫЕ КАТУШКИ

Для наиболее ходовых напряжений 6—10 *кв* для трансформаторов до 560 *ква* получили большое распространение слоевые катушки из круглого провода. Если на фиг. 3-26 выбросить все промежуточные простые и угловые шайбы, то все слои будут иметь длину, равную длине обмотки, т. е. вся обмотка будет состоять из одной секции (фиг. 3-29).

Слоевые катушки требуют значительно меньше времени на намотку. Кроме того, в слоевых катушках можно улучшить условия охлаждения, устраивая вертикальные каналы (фиг. 3-30). Эти каналы (горизонтальные в процессе намотки, как показано на фиг. 3-30), получаются таким образом, что после



Фиг. 3-29. Слоевая катушка.

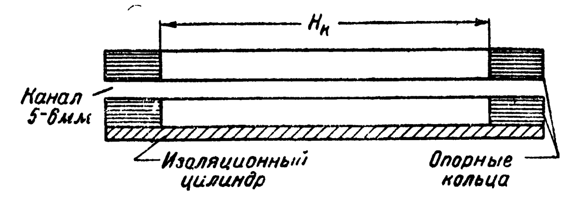
намотки на цилиндре нескольких слоев укладываются рейки, образующие канал, и далее намотка производится поверх этих реек, закрытых тонким листом (0,2—0,5 *мм*) электрокартона. Как показали специальные испытания, наблюдаемые у слоевых обмоток напряжения между витками и между слоями при импульсных воздействиях, значительно ниже междувитковых и междукатушечных напряжений, наблюдавшихся у секционных или непрерывных катушек. Таким образом, слоевые обмотки в некотором роде приближаются к нерезонирующим типам катушек. Экран внешний и внутренний делают катушку почти полностью нерезонирующей.

Для того чтобы получить опорную поверхность для катушки, первоначально к междуслойной изоляции приклеивали полоски электрокартона — «бортик» (фиг. 3-29). В дальнейшем широкое применение получил другой способ, показанный на фиг. 3-31, концевой виток обхватывался полоской изоляционной бумаги (концевая изоляция), которая прижималась последующими витками. Междуслойная изоляция не выступает за пределы катушки, а на выступы цилиндра надеваются массивные опорные кольца из прессбака.

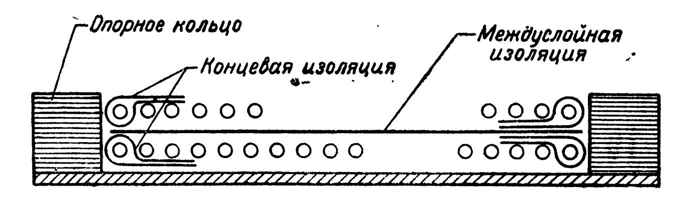
Другая особенность слоевых обмоток — это сравнительно большая толщина междуслойной изоляции. Так, для напряжения на слой до 500 *в* применяются два слоя бумаги по 0,12 *мм*, т. е. 0,24 *мм*. При дальнейшем увеличении числа слоев междуслойной изоляции приходится считать, что напря-

жение на слой витков катушки может быть повышено на 200—150 *в* на каждый новый слой изоляционной бумаги.

Расчет осевых и радиальных размеров производится по тем же формулам, как и для секционных катушек (3-10) и (3-11). Равным образом, для секционных катушек рекомендуется последний (верхний) слой витков делать неполным. В тех случаях, когда обмотка имеет вертикальный канал, при расчете радиальных размеров, кроме толщины масляного ка-



Фиг. 3-30. Слоевая катушка с каналом.



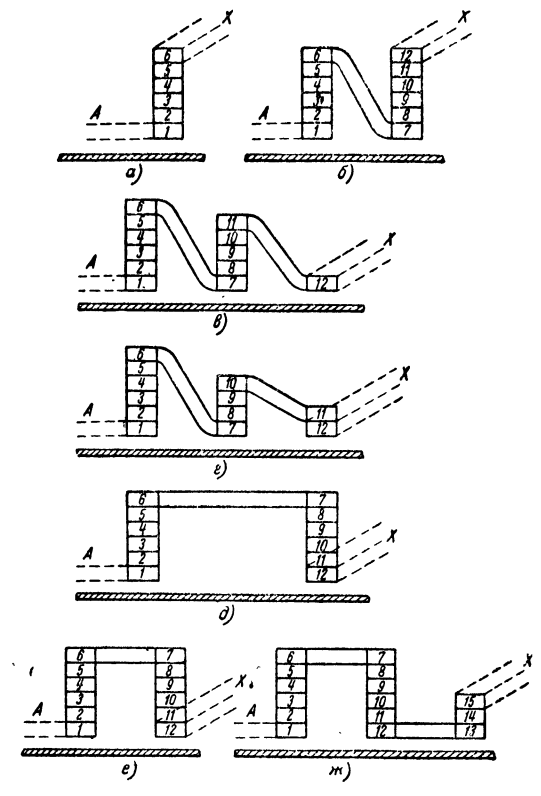
Фиг. 3-31. Детали изоляции концевых витков в слоевых катушках.

нала, необходимо учесть еще толщину электрокартона, прокладываемого поверх клиньев для того, чтобы не проваливались витки первого слоя второй половины катушки. Кроме того, учитывая утолщение на концах катушки, рекомендуется при расчете радиальных размеров увеличивать последние на 0,5 *мм* на каждые 2—3 слоя обмотки.

3-6. НЕПРЕРЫВНЫЕ КАТУШКИ

Способ изготовления специальных дисковых катушек без паек на переходах, именуемых непрерывными катушками, уже неоднократно освещался в технической литературе. Непрерывные катушки делаются только из проводов прямоугольного сечения. На фиг. 3-32 показаны последовательные стадии изготовления этих катушек. Конец *А* есть закрепленное на оправке начало катушки. Конец же *X* — всегда идет к барабану с медью, который стоит за станком. Последний, таким образом, должен вращать верхнюю часть плоскости чертежа на читателя. Фиг. 3-32,*а* показывает вертикальный разрез пер-

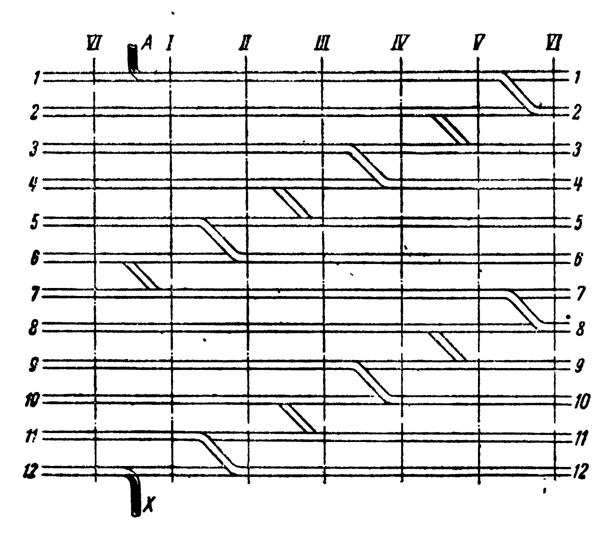
вой неперекладной катушки, на котором показано положение первых шести витков. Следующие шесть витков от 7 до 12 мотаются в виде временной перекладной катушки (фиг. 3-32,*б*). В ней при помощи изгиба соединительного провода седьмой виток является нижним. Далее станок останавливается, ко-



Фиг. 3-32. Схема намотки непрерывной катушки.

нец X неподвижно закрепляется, станку дается небольшое вращение в обратную сторону, из-за чего получается некоторая «слабина» в только что намотанной перекладной катушке. В силу этого оказывается возможным снять верхний двенадцатый виток (фиг. 3-32,*в*) и переложить его рядом вниз. При этом, однако, слабина в намотке перекладной катушки осталась, и потому на двенадцатый виток можно переложить одиннадцатый виток (фиг. 3-32,*г*) и т. д. перекладываются все остальные витки (фиг. 3-32,*д*). Давая теперь небольшое нормальное вращение станку, выбирается слабина в переложенной катушке, которая одновременно передвигается к первой катушке (фиг. 3-32,*е*). Последний рисунок (фиг. 3-32,*ж*) пока-

зывает намотку второй неперекладной катушки, т. е. 13, 14, 15 и т. д. витков, после намотки которой повторяется только что описанный процесс. В результате получается ряд дисковых катушек, имеющих поочередно переходы то внутри, то снаружи катушек. Все эти переходы из одной катушки в другую выполнены из обмоточного провода без каких-либо паек. Это является самым главным достоинством непрерывных катушек.



Фиг. 3-33. Внешние и внутренние переходы в непрерывной катушке.

Большим удобством непрерывной катушки является то, что в каждой перекладной и неперекладной катушке может быть не целое, а дробное число витков. Из-за этого общее число витков не зависит от общего числа одинарных катушек. Так, например, если в каждой одинарной катушке делать $5^5/_6$ витка, то при двенадцати одинарных катушках общее число витков во всей непрерывной катушке было бы

$$12 \cdot 5^5/_6 = 70 \text{ витков.}$$

Схематически эта катушка показана на фиг. 3-33. Здесь римскими цифрами показаны оси прокладок между одинарными катушками. Число катушек равно 12. Дважды повторяющаяся римская цифра *VI* показывает, что катушка как бы разрезана по вертикали *VI* и распрямлена по плоскости. Если начало катушки *A* находится в пролете между *VI* и *I* подкладками, то первый внешний переход находится уже между *V* и *VI* прокладками. Каждый следующий переход отступает на $^1/_6$ окружности от предыдущего перехода.

На практике, однако, и эта простая раскладка витков упрощается таким образом, что делаются катушки только с целым числом витков, но в одной непрерывной обмотке допускаются разные одинарные катушки с числом витков, отличающимся на 1. Так в данном случае обмотка была бы выполнена в следующем виде

$$\frac{70}{12}=5+\frac{10}{12},$$

10 катушек по 6 витков $=60$
$\frac{2}{12}$ » » 5 » $=\frac{10}{70}$

Если бы требовалось эту непрерывную катушку выполнить с 71 витком, то расчет показал бы, что остаток от деления числа витков на число катушек показывает, сколько одинарных катушек должно быть сделано с числом витков на 1 больше, чем число целых витков, полученных в частном, т. е.

$$\frac{71}{12}=5+\frac{11}{12}$$

и, следовательно,

11 катушек по $(5+1)=6$ витков, всего	66 витков
1 катушка по 5 витков	5 витков
12 катушек	71 виток

Аналогичный расчет для 69 витков дал бы

$$\frac{69}{12}=5+\frac{9}{12}$$

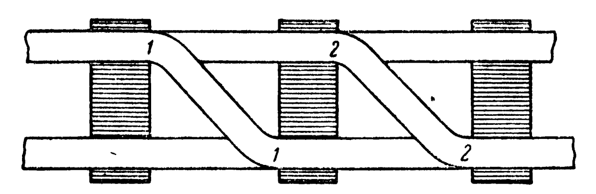
9 катушек по $(5+1)=6$ витков всего	54 витка
3 катушки по 5 витков всего	15 витков
12 катушек	69 витков

Очевидно, что во всех этих случаях внешний вид схемы выглядел бы совершенно одинаково — все внешние и внутренние переходы были бы расположены в пролете между *VI* и *I* осями прокладок.

Если сечение провода оказывается большим и неудобным для намотки, то непрерывную катушку мотают из нескольких проводов в параллель. Обычно число параллелей берется не больше четырех. В этих случаях переходы делаются в нескольких пролетах. Так, на фиг. 3-34 показано расположение внешних переходов для катушки из двух параллельных проводов. Фиг. 3-34 показывает также, что после перехода параллельные провода поменялись местами в катушке; если в верхней катушке наружным проводом был провод *1*, то в нижней ка-

тушке наружным проводом стал провод 2. Эта перемена местами параллельных проводов благоприятно сказывается на понижение добавочных потерь от вихревых токов, так как каждая параллель занимает всевозможные положения проводов в радиальном направлении одинарных катушек.

Непрерывные катушки с внутренним диаметром меньше 150—200 *мм* становится трудно изготовить. Поэтому внутрен-



Фиг. 3-34. Транспозиция двух проводов в непрерывной катушке.

ний диаметр непрерывной катушки должен быть не меньше 200—150 *мм*. Наиболее удобны для намотки непрерывных катушек провода с большим отношением размеров сторон порядка 2—3. Провода с сечением, приближающимся к квадрату, мало пригодны для непрерывных катушек.

Непрерывные катушки применяются чаще всего для высоковольтных обмоток трансформаторов мощностью от 560—1 000 *ква* или для обмоток среднего или низшего напряжения трансформаторов от 10 000 *ква* и выше.

Расчет радиальных размеров $b_к$ производится по формуле

$$b_к = 1{,}03nb, \qquad (3\text{-}12)$$

где n — число витков в слое;

b — размер изолированного провода в *мм* в радиальном направлении (фиг. 3-35).

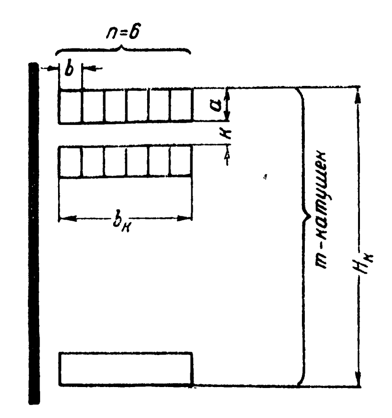
Коэффициент 1,03 учитывает возможные производственные отклонения.

Осевой размер получается, как сумма всех осевых размеров проводов и сумма всех вертикальных размеров каналов. Если катушка состоит из одинаковых катушек с осевым размером провода a *мм* и с каналами, имеющими все вертикальный размер k *мм*, то осевой размер $H_к$ катушки равен

$$H_к = ma + (m-1)k. \qquad (3\text{-}13)$$

Обычно при этом подсчете учитывается, что при окончательной сушке трансформатора и его прессовке электрокартонные прокладки несколько усохнут (в пределах 3—4%). Вследствие этого размер $H_к$ берется несколько большим, чем окончательно необходимый размер.

Почти всегда вертикальные размеры каналов в одной и той же непрерывной катушке бывают различными. Вертикальные размеры каналов не делаются с дробным числом миллиметров. Различные вертикальные размеры каналов позволяют не делать дробных размеров каналов. В высоковольтных обмотках (на 35 *кв* и выше) выходные катушки в количестве 2—3% от общего числа витков делаются с усиленной изоляцией, так как при импульсном воздействии эти катушки оказываются в наиболее неблагоприятном положении. Одновременно с усилением витковой изоляции проводов крайние 4—6 каналов тоже делаются с увеличенными вертикальными размерами.



Фиг. 3-35. Осевые и радиальные размеры дисковой катушки.

Наконец, в ряде случаев (чаще всего в низковольтных обмотках мощных трансформаторов) в непрерывных катушках делается специальный «разгон» одинарных катушек путем увеличения каналов между ними. Этот разгон создает местное уменьшение плотности распределения витков с током по высоте обмотки, которое уравновешивает местное уменьшение плотности распределения витков с током в высоковольтной обмотке, получившееся из-за отключения в ней витков для регулирования напряжения.

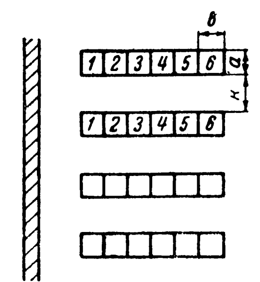
3-7. СПИРАЛЬНЫЕ КАТУШКИ

У трансформаторов большой мощности обмотки низшего напряжения имеют небольшое число витков — до 2—3 десятков витков. Но сечение этих витков должно быть весьма большим, так что его пришлось бы делать из большого числа (6 и более) параллельных проводов. Выше было указано, что в цилиндрических обмотках не применяется больше 3—4 параллельных проводов. Эти провода укладываются рядом один с другим в одном слое. Увеличение числа параллельных проводов приведет к чрезмерно большому «шагу» витка. Катушка получается неустойчивая с плохим использованием высоты.

Поэтому в тех случаях, когда применение цилиндрических катушек становится затруднительным из-за большого числа параллелей, переходят на так называемые «спиральные катушки». Они отличаются от цилиндрических, по существу, тоже спиральных катушек, тем, что каждый виток состоит из большого числа параллельных проводов, уложенных друг на

друге (фиг. 3-36) для шести параллельных проводов. Отдельные же спирали (витки) укладываются не плотно друг к другу, как в цилиндрических катушках, а между витками делаются каналы. Показанная на фиг. 3-36 часть спиральной катушки содержит всего 4 витка, в каждом из которых 6 параллельных проводов. Этот рисунок показывает, что общий продольный разрез спиральной и непрерывной обмоток, на первый взгляд, мало чем отличается друг от друга.

Намотка катушки производится таким образом, что мотается спираль из всех параллельных проводов сразу. В тех случаях, когда число параллельных проводов становится слишком большим (например, 12—16 параллельных проводов), то все число параллелей разбивается на два рядом лежащих пучка проводов и, таким образом, получается двухходовая спираль.



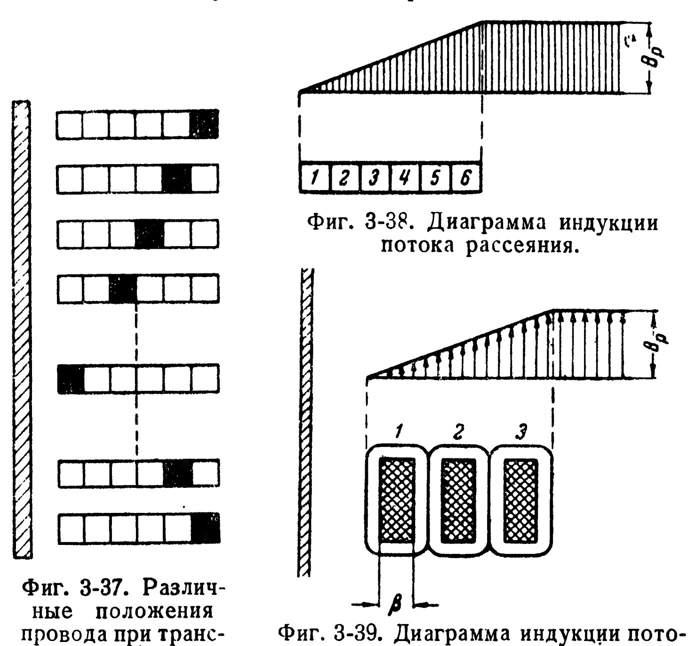
Фиг. 3-36. Спиральная катушка.

Расчет и изготовление спиральных катушек весьма сильно осложняются из-за добавочных потерь в проводах. Как известно, добавочные потери от вихревых токов в толще проводов зависят в первом приближении от четвертой степени того размера провода, который расположен перпендикулярно потоку рассеяния. Для концентрического типа обмоток радиальный размер катушки как раз является тем размером, который влияет на значение добавочных потерь. В спиральных катушках, у которых все провода, расположенные в радиальном направлении, соединяются в параллель на концах катушки, число радиально расположенных проводов будет определять значение добавочных потерь. В этом случае приближенно считают, что добавочные потери пропорциональны четвертой степени суммы радиальных размеров всех проводов одного витка. Как показывают расчеты, эти добавочные потери могут достигнуть весьма больших и недопустимых значений.

Для уменьшения этих добавочных потерь делают так называемую транспозицию проводов. Основная идея этой транспозиции заключается в том, что каждый отдельный параллельный проводник не должен сохранять неизменным свое место в радиальном ряду проводов, как это показано на фиг. 3-36. Там параллельный провод № 6 всегда остается внешним по всей высоте обмотки и, следовательно, остается все время в магнитном поле рассеяния, имеющем одно и то же значение осевой составляющей индукции. Наоборот, при помощи транспозиции стремятся, чтобы внешний провод поочередно занял бы все возможные положения в радиальном на-

правлении, как это показано, например, для зачерненного провода на фиг. 3-37.

Как известно, обычно считают, что в радиальном направлении осевая составляющая индукции потока рассеяния изменяется прямолинейно от нуля до максимального значения B_p (фиг. 3-38) в канале рассеяния между обмотками при равномерном распределении тока в радиальном направлении катушки. Поэтому провод № 6 фиг. 3-36 оказался бы всегда в области наибольшей индукции потока рассеяния. Следовательно,



Фиг. 3-37. Различные положения провода при транспозициях.

Фиг. 3-38. Диаграмма индукции потока рассеяния.

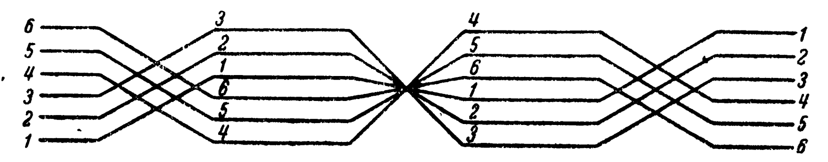
Фиг. 3-39. Диаграмма индукции потока рассеяния для дисковой катушки.

в этом проводе наводилась бы наибольшая разность напряжений на внешних краях провода, что привело бы к наибольшей неравномерности распределения в нем тока. Однако, то обстоятельство, что на концах катушки все провода соединены в параллель, приводит к неравномерному распределению тока по параллельным проводам, т. е. к криволинейному изменению индукции в радиальном направлении, значительно отличающемуся от первоначального допущения. Это изменение кривой распределения магнитной индукции приводит к еще большей неравномерности распределения тока в проводе, прилежащем к каналу рассеяния, вызывая иногда недопустимые местные повышения температур.

Обычно считают, что добавочные потери в проводе, состоящем из нескольких параллельных проводов, равны доба-

вочным потерям в таком проводе, толщина которого равна сумме толщин отдельных проводов. Так, если (фиг. 3-39) катушка состоит из трех проводов с радиальным размером (например, $\beta = 6$ *мм* $= 0,6$ *см*), то для непрерывной обмотки можно приближенно считать, что в первом слое добавочные потери будут равны 1,2%, во втором слое 9,6%, а в третьем слое 27,5%. В среднем добавочные потери были бы равны 12,8% для всех трех слоев.

Если же эти все три провода образуют один виток спиральной катушки, не имеющей транспозиции, то считают, что добавочные потери были бы такие, как у провода с радиальным размером $3\beta = 1,8$ *см*. В этом случае однослойная катушка с $\beta = 1,8$ *см* будет иметь добавочные потери порядка 65%. Но если каждый провод будет последовательно занимать



Фиг. 3-40. Схема транспозиций в спиральной катушке.

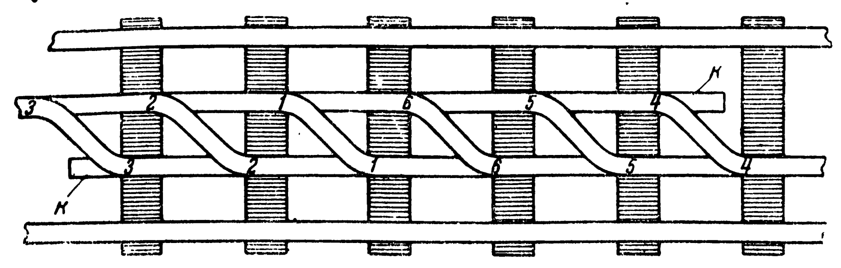
все места в радиальном направлении, как показано на фиг. 3-37, то это перемещение провода будет приводить к прямолинейному распределению индукции потока рассеяния, и добавочные потери упадут до значения 12,8%, т. е. добавочные потери станут равными средним добавочным потерям в трехслойной катушке с размером провода $\beta = 0,6$. Такое последовательное размещение провода во всех положениях в радиальном направлении называется полной транспозицией. На практике редко осуществляют полную транспозицию, так как она чрезмерно увеличила бы осевой размер катушки, ибо каждая перемена положения проводов потребовала бы дополнительного места.

Поэтому транспозиции делают так, как показано на фиг. 3-40. На этой фигуре горизонтальные линии показывают распрямленную длину всех витков катушки. На краях, т. е. после одной четверти числа витков и после $^3/_4$ всех витков делается транспозиция, путем перекрещивания одной половины проводов с другой. Средняя транспозиция, осуществляемая по середине высоты катушки, меняет положение каждого провода на симметричное по отношению к середине.

Применяя такие три транспозиции, можно считать, что добавочные потери упадут до значения, равного среднеарифметическому значению добавочных потерь при двух различных полных транспозициях — одной для провода, имеющего радиальный размер одного параллельного провода, а другой — для

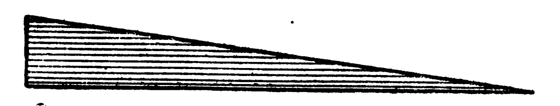
провода удвоенного радиального размера, но для вдвое меньшего числа слоев.

Практически средняя транспозиция выполняется так, как показано на фиг. 3-41 (для шести параллельных проводов). Этот рисунок показывает также, что такая транспозиция требует добавочного места в осевом направлении катушки, ибо



Фиг. 3-41. Схема средней транспозиции для 6 проводов.

вместо непрерывного вращения по спирали происходит из-за выгиба проводов внезапный переход с одной спирали на другую и в тех местах, где нет изгиба витков при транспозиции образуется свободное пространство (уширенный канал) между двумя соседними витками. На фиг. 3-41 показано, что в месте транспозиции под конец одного витка и начало другого витка подкладываются клинья *k* (см. фиг. 3-42). Они служат для того, чтобы после изгиба верхнего провода (№ 3 по фиг. 3-41) не надо было бы его опускать в крайнее нижнее положение. Он укладывается на клин *k* из полос электрокартонных и



Фиг. 3-42. Выравнивающий клин.

постепенно понижается до своего нижнего положения по мере того, как изгибаются следующие провода. Аналогичный клин постепенно поднимает нижние провода верхней секции. Эти клинья привязываются лентой к соответствующим виткам.

Равным образом транспозиция половинным числом витков требует добавочного места по осевому направлению (фиг. 3-43). В итоге все три транспозиции потребуют увеличения осевого размера катушки на 3 осевых размера провода и на 3 ширины канала между витками.

Так же, как и в цилиндрических катушках, осевой размер катушки необходимо увеличить еще на 1 виток (и 1 канал) для того, чтобы учесть начало и конец обмотки.

Поэтому, если a — осевой размер изолированного провода и m — число витков в катушке, то осевой размер катушки $H_к$ в *мм* равен

$$H_к = (m + 4)\,a + (m + 3)\,k, \qquad (3\text{-}14)$$

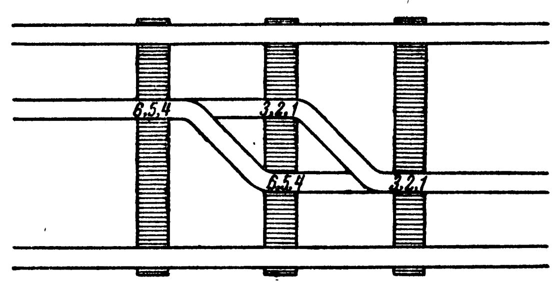
где k — осевой размер канала (фиг. 3-36).

Радиальный же размер $b_к$ в *мм* подсчитывается так же, как и для непрерывной обмотки

$$b_к = 1{,}03nb, \qquad (3\text{-}15)$$

здесь b — радиальный размер провода, а n — число параллельных проводов.

Для двухходовых спиралей вопросы транспозиции решаются значительно проще. Там все транспозиции производятся в

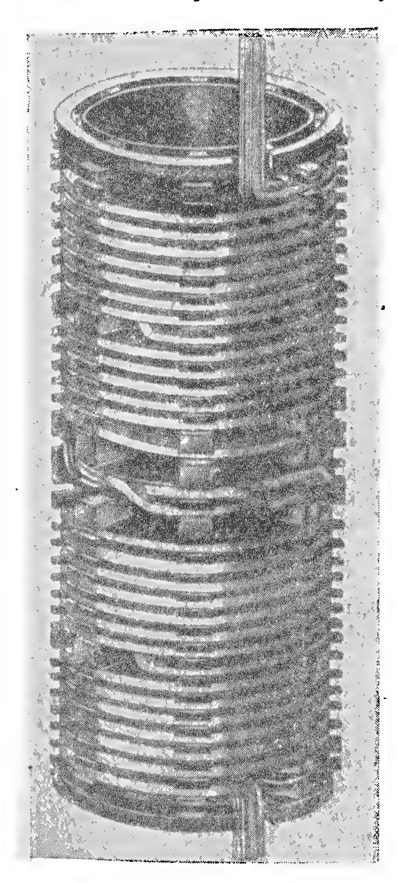


Фиг. 3-43а. Схема транспозиции половинным числом витков вида спиральной катушки.

пределах одного и того же витка путем перемещения проводов из одной половины в другую. Так, на фиг. 3-44 показана спиральная обмотка из двенадцати параллельных проводов в виде двухходовой спирали, а на фиг. 3-45 показана транспозиция между двумя половинами одного электрического витка. Верхний виток первой половины, изгибаясь, переходит на место верхнего витка во вторую половину параллелей и одновременно нижний проводник (№ 12), изгибаясь переходит на место нижнего витка первой половины параллелей. Расположение проводов после первой транспозиции показано на фиг. 3-44 у второй пары секций. Крайняя пара секций на фиг. 3-44 показывает расположение проводов после второй транспозиции. Эти транспозиции не требуют, таким образом, увеличения осевого размера катушки. Путем этих переходов достигается полная транспозиция, т. е. любой параллельный провод будет два раза занимать любое положение в радиальном направлении (фиг. 3-37). Так же, как и в непрерывных обмотках, нет никакой необходимости делать транспозиции после целого числа витков. Благодаря этому число витков и

число параллельных проводов не зависят друг от друга, но число подкладок по окружности и число параллельных проводов должны быть равны или кратны. В этих случаях всегда после всех транспозиций будет одинаковым расположение проводов в первом и последнем витках, что является проверкой правильности транспозиций.

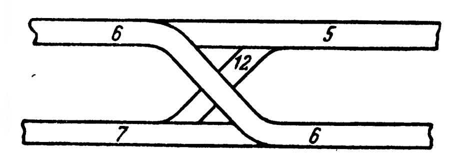
Очевидно, что в такой двухходовой спирали процент добавочных потерь равен проценту добавочных потерь непрерывной обмотки, имеющей столько же витков (слоев), как и одна половина параллелей спиральной ка-



Фиг. 3-43б. Общий вид катушки с транспозицией.

1-й виток		2-й виток		3-й виток	
6	7	5	6	4	5
5	8	4	7	3	6
4	9	3	8	2	7
3	10	2	9	1	8
2	11	1	10	12	9
1	12	12	11	11	10

Фиг. 3-44. Двухходовая спиральная катушка.



Фиг. 3-45. Схема транспозиции в двухходовой спиральной катушке.

тушки и имеющей такой же радиальный размер провода (без изоляции), как и одна параллель спиральной катушки.

Осевой размер $H_к$ в *мм* двухходовой спиральной катушки, состоящей из m витков и намотанной из провода с осевым размером (с изоляцией) a *мм*, равен

$$H_к = 2a(m+1) + (2m+1)k, \qquad (3\text{-}16)$$

где k — осевой размер канала в *мм*.

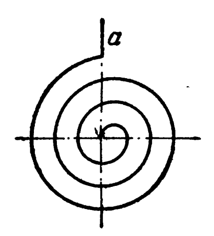
Если n число параллельных проводов в одной половине витка, то радиальный размер катушки подсчитывается по той же формуле (3-15), что и для одноходовых спиральных катушек.

Так же, как и непрерывные катушки, спиральные катушки делаются с внутренним диаметром не менее 200 *мм*. При меньших диаметрах трудно осуществить изгибы для переходов. Для спиральных катушек, как и для непрерывных, применяются предпочтительно провода с вытянутой в осевом направлении формой сечения, т. е. с отношением размеров сторон около 1 : 2 или 1 : 3. Радиальный размер единичного провода (одной параллели) не берется больше, чем 3—3,5 *мм* без изоляции.

3-8. ДИСКОВЫЕ КАТУШКИ

Дисковые катушки мотаются из проводов прямоугольного сечения. Они имеют один провод в слое и имеют вид плоской спирали. Вертикальный разрез обмотки из дисковых катушек имеет тот же вид, что и вертикальный разрез непрерывной обмотки. Во многих отношениях эти два типа катушек взаимно-заменяемы. Можно даже характеризовать непрерывную катушку, как систему дисковых катушек, но выполненную без паек.

В дисковых катушках пайки для соединения между собой соседних катушек неизбежны. Поэтому всюду, где это возможно, дисковые катушки заменяются непрерывными.



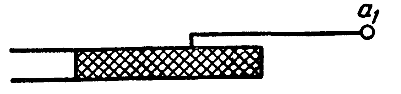
Фиг. 3-46. Одинарная дисковая катушка.

Различают одинарные и двойные дисковые катушки. Вообще говоря, направление намотки одинарной дисковой катушки безразлично. На самом деле, если внешний конец всегда считать началом обмотки, то в изображенной условно на фиг. 3-46 одинарной дисковой катушке направление тока будет против часовой стрелки. Но если повернуть эту катушку так, что она ляжет на плоскость чертежа своей верхней поверхностью, то направление тока изменится на обратное, т. е. ток станет проходить по часовой стрелке, если исходить из того же начала катушки. Направление намотки одинарной дисковой катушки приобретает только тогда значение, когда приходится делать отпайку a_1 от какого-либо промежуточного витка (фиг. 3-47). На самом деле, если такую катушку перевернуть для получения иного направления тока, то отпайка переместится в другой канал, что может быть недопустимо по конструктивным соображениям.

Так же, как и для секционных катушек, избегают применения одинарных дисковых катушек, ибо для последовательного соединения катушек пришлось бы соединительным про-

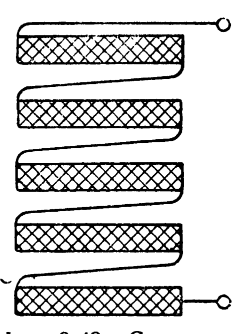
водом пройти в канале между катушками (фиг. 3-48) и из-за этого увеличить осевой размер всей обмотки.

Поэтому всегда спаивают внутренние концы одинарных дисковых катушек так, как это показано на фиг. 3-24 и 3-25.



Фиг. 3-47. Отпайка в одинарной дисковой катушке.

Однако, общеизвестен способ намотки двойных дисковых катушек без пайки внутренних переходов. Этот способ состоит в том, что сначала наматывается на шаблон такое количество провода, которое потребуется для намотки первой половины катушки. Но эта намотка производится в предварительном порядке и эта часть проводов укладывается на шаблон так, чтобы ее можно было бы впоследствии легко снять с шаблона. Далее без обрыва провода и не снимая первой половины катушки, мотается в окончательном виде вторая одинарная катушка. По окончании намотки второй одинарной катушки первая половина снимается с шаблона и переносится на другой барабан так, чтобы, сматывая с него эти провода, можно было первую часть катушки перемотать в обратном направлении. В результате получается двойная дисковая катушка, внутренний переход в которой осуществлен без пайки провода.



Фиг. 3-48. Схема переходов в одинарных дисковых катушках.

Как одинарные, так и двойные катушки, можно мотать из нескольких параллельных проводов, так же как и непрерывные катушки. Однако, больше 2—3, очень редко четырех, параллельных проводов не применяют.

Расчет осевых и радиальных размеров обмотки, состоящей из ряда дисковых катушек производится по тем же формулам (3-13) и (3-12), что и для непрерывных катушек.

Переход

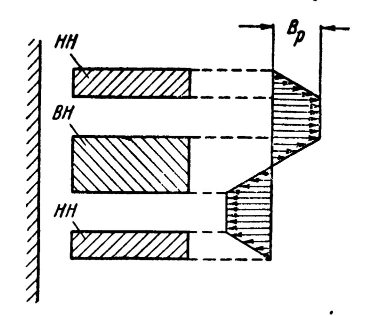
Шайба

Фиг. 3-49. Двойная дисковая катушка с шайбой.

Иногда двойные дисковые катушки выполняются с шайбой между одинарными катушками (фиг. 3-49). Это исполнение с промежуточной шайбой применяется и для непрерывных обмоток. В этом случае в формулу (3-13) надо внести соответствующие изменения, учитывающие число и размеры каналов и число и толщину шайб.

Как это было указано выше, дисковые катушки очень редко применяются для обмоток концентрического типа. Для чередующегося же типа обмоток дисковые катушки являются

почти единственным типом применяемых катушек. Только в некоторых случаях одновременно вместе с дисковыми катушками применяются и спиральные. В последнем случае они могут быть выполнены весьма просто, так как отпадает необходимость в транспозиции спиральных катушек, ибо в чередующемся типе обмоток направление магнитного потока рассеяния иное, чем в концентрическом типе обмоток. В чередующемся типе обмоток магнитный поток в канале между катушками ВН и НН идет в радиальном направлении, как показано на фиг. 3-50.



Фиг. 3-50. Схема потока рассеяния в чередующейся дисковой обмотке.

Чередующийся тип обмотки и дисковые катушки применяются в основном для специальных многоамперных трансформаторов, а также в трансформаторах броневого типа.

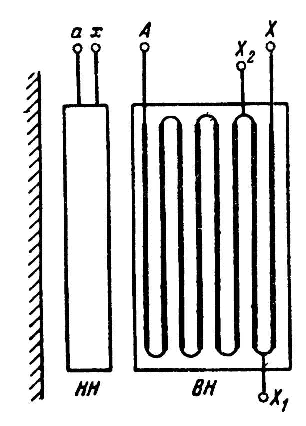
3-9. ОТПАЙКИ ДЛЯ РЕГУЛИРОВКИ НАПРЯЖЕНИЯ

Все силовые трансформаторы, изготавливаемые по стандарту, должны иметь в обмотке высшего напряжения отпайки для регулировки напряжения на $\pm 5\%$. Трансформаторы, предназначаемые для питания специальных установок, например, электрических печей, лабораторных установок и т. п. могут иметь самые разнообразные условия для регулирования напряжения. Ниже даются указания о выполнении регулировочных витков у силовых трансформаторов, т. е. для регулировки напряжения на $\pm 5\%$.

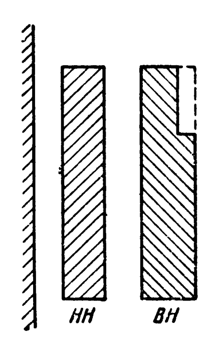
Очевидно, что при наличии регулировочных витков в обмотке предполагается возможность длительной работы трансформатора на такой ступени напряжения, при которой все регулировочные витки окажутся отключенными и они будут обесточены. Как известно, отключение витков в одной обмотке приводит к несимметричному распределению витков с током одной обмотки по отношению к виткам с током другой обмотки. Несимметричное распределение витков с током приводит к появлению значительных механических усилий в обмотках при коротких замыканиях.

Для уменьшения этих механических усилий при коротком замыкании были разработаны особые схемы расположения регулировочных витков. Вообще говоря, можно было бы полностью устранить эту причину возникновения механических усилий при коротком замыкании, если бы отключаемые витки

не нарушали бы симметрии в распределении витков с током. Так, например, если в слоевой обмотке высшего напряжения каждая регулировочная ступень занимала бы точно место одного слоя (фиг. 3-51), то отключаемые части обмотки от X до X_1, или от X до X_2 не нарушили бы симметрии витков с током одной обмотки по отношению к другой. Такое удачное расположение витков встречается, как исключение. Однако, практика показала, что для слоевых обмоток вполне допустимо отключение неполного слоя (фиг. 3-52), если в оставшейся части в общей сложности будет более 6—7 слоев, т. е. чтобы



Фиг. 3-51. Регулировочные слои в слоевой катушке.

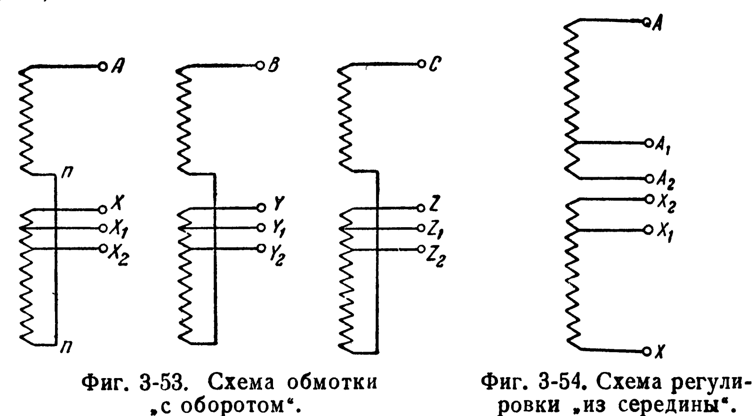


Фиг. 3-52. Схема отключенных витков в слоевой катушке.

уступ (фиг. 3-52), образованный неполным слоем, был бы относительно не слишком велик. С этой точки зрения понятно, что устраивать регулировку низшего напряжения в цилиндрических катушках нецелесообразно, не говоря уже о том, что было бы весьма затруднительно вывести регулировочные концы, имеющие большое сечение. Равным образом избегают делать отпайки в спиральных катушках, которые часто применяются как обмотки низшего напряжения трансформаторов средней мощности.

В секционных и непрерывных обмотках высшего напряжения витки расположены таким образом, что отключаемые части катушек располагаются в радиальном направлении. Поэтому для этих обмоток отключаемые витки располагаются по середине высоты обмотки. В этом случае осевые механические усилия при коротком замыкании получаются меньше, чем в том случае, если отключаемые витки расположены с одной стороны по высоте обмотки (см. приложение X, лист 2 и далее § 5-4).

Если обмотка высшего напряжения соединена в звезду, то регулировочные витки удобнее располагать у нейтрального конца обмотки. Тогда для всех трех фаз можно устроить общий переключатель. В этом случае размещение регулировочных витков по середине высоты обмотки получается при выполнении обмотки по схеме «с поворотом» (фиг. 3-53). На этой схеме ступень $+5\%$ получается путем соединения концов X, Y, Z, средняя ступень — путем соединения концов X_1, Y_1, Z_1 и, наконец, ступень -5% — путем соединения концов X_2, Y_2, Z_2.



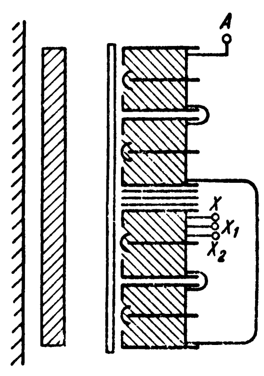
Фиг. 3-53. Схема обмотки „с оборотом".

Фиг. 3-54. Схема регулировки „из середины".

Очевидно, нижняя половина обмотки должна иметь другое направление намотки, чем верхняя, т. е. если верхняя половина, если на нее смотреть сверху от точки A, имеет левое направление вращения витков, то нижняя половина, смотря сверху от точки X, должна иметь правое направление вращения. При изготовлении обмоток по этой схеме следует обращать внимание на достаточное изоляционное расстояние (разрыв) между нижней точкой n верхней половины обмотки и точкой X (фиг. 3-53), между которыми приложено около половины фазного напряжения. При импульсных же воздействиях в этом месте можно ожидать повышенные градиенты, так как из-за разрыва нарушилась однородность строения изоляции обмотки (см. главу 4).

Если обмотка высшего напряжения соединена в треугольник, то каждая фаза должна иметь свой переключатель, и поэтому схему обмотки высшего напряжения можно упростить и не делать поворота, а применять схему, показанную на фиг. 3-54. На этой фигуре показана только одна фаза. Все фазы выполняются одинаково. Междуфазовые соединения в треугольник концов X и B, Y и C, Z и A выполняются наглухо. Соединение концов A_1 и X_1 соответствует ступени -5%,

концов A_2 и X_2 — ступени +5%. Для средней ступени можно соединить либо A_1 и X_2, либо A_2 и X_1. Для этой схемы соединения обе половины обмотки имеют одинаковое направление намотки. Наибольшее напряжение между точками A_2 и X_2 будет в том случае, если соединены концы A_1 и X_1. Тогда между A_2 и X_2 напряжение будет равно 10% от полного фазного напряжения. Однако, в этой схеме имеется нарушение однородности строения изоляции, подобное тому, которое было и у предыдущей схемы. Поэтому практически размеры разрывов в обеих схемах мало отличаются друг от друга.



Фиг. 3-55. Схема секционной обмотки „с оборотом".

В непрерывных обмотках стремятся так распределять витки по катушкам, чтобы все отпайки X_1, X_2 и A_1, A_2 в обеих схемах приходились на внешние переходы из одной катушки в другую. Обычно получается, что регулировочные катушки имеют меньшее число витков, чем катушки в главной части обмотки. Для того, чтобы и те, и другие катушки имели бы одинаковые радиальные размеры, приходится в регулировочных катушках делать разгон, т. е. прокладывать между витками полоски электротехнического картона.

Для секционных обмоток применяются те же 2 схемы. Схема с «оборотом» показана на фиг. 3-55.

Число катушек на фиг. 3-55 дано применительно к наиболее распространенному напряжению 6 000 *в*. В некоторых старых трансформаторах можно встретить такое выполнение регулировочной части обмотки, когда каждая регулировочная ступень выполнялась в виде отдельной катушки. Такое выполнение было характерно для обмоток на 35 000 *в*. Для обмоток на более низкие напряжения 10 и 6 *кв* регулировочные витки не выделяются в отдельные катушки, и все катушки делаются с одинаковым числом витков. Некоторые детали выполнения отпаек от таких катушек показаны на фиг. 3-28. Для секционных катушек по «оборотной» схеме справедливы те же указания относительно направления намотки, что и для непрерывных обмоток.

Секционные обмотки могут быть выполнены по схеме фиг. 3-54. В обоих случаях, по схеме «с оборотом» и по схеме фиг. 3-54, разрывы между половинами обмотки заполняются набором шайб.

Дисковые обмотки применяются обычно для специальных трансформаторов. Некоторые указания и схемы см. далее в § 2-5, фиг. 5-2, 5-3, 5-4.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

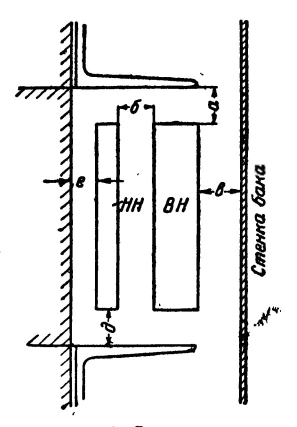
ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТОК

4-1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

В предыдущих главах были рассмотрены различные типы обмоток и остовов. В главе об остове трансформатора были даны формулы для магнитного расчета остова и был дан пример расчета остова. В главе об обмотках в основном были указаны способы расчета размеров обмотки, т. е. раскладки витков. В сущности говоря, эту раскладку витков можно делать только после установления основных изоляционных расстояний для обмоток. Таким образом, на практике ход расчета несколько отличается от последовательного изложения теории — сначала определяются изоляционные расстояния, потом производится выбор типа катушек, раскладка витков и далее следуют указанные в этом разделе электрические, магнитные, тепловые и механические расчеты. Расчет же веса и потерь в стали в окончательном виде производится после того, как сделана раскладка витков.

4-2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ПРИ 50 *гц*

На фиг. 4-1 схематически показаны основные изоляционные расстояния, минимальные размеры которых следует установить перед началом расчета обмоток. Эти размеры потому названы минимальными, что часто по ряду конструктивных и производственных соображений эти размеры приходится увеличивать. Необходимо таким образом установить минимальные изоляционные расстояния *а*, *б* и *в* — от обмотки высшего напряжения (ВН) до заземленных частей остова или ярма, до обмотки низшего напряжения и до стенки бака, а также расстояния *д* и *е* от обмотки низшего напряжения (НН) до заземленных частей остова (прессующих ярмо балок) и до вертикальной поверхности остова.



Фиг. 4-1. Схема основных изоляционных расстояний.

Надежность трансформатора в эксплоатации в первую очередь зависит от достаточной диэлектрической прочности этих основных изоляционных расстояний. В эксплоатации почти неизбежны случаи, когда трансформатор, хотя бы крайне кратковременно, подвергается воздействию более высоких напряжений из-за атмосферных разрядов, из-за

изменения схемы коммутации сетей, из-за аварийных состояний в других частях сети, из-за внезапного отключения нагрузки и из-за еще целого ряда причин. Поэтому считают необходимым проверять надежность исполнения изоляции обмоток трансформатора путем испытания трансформаторов повышенным напряжением.

В настоящее время установлены следующие величины действующих значений испытательных напряжений при 50 *гц* в течение 1 мин. для силовых трансформаторов в зависимости от значения номинального рабочего напряжения сети (класса изоляции).

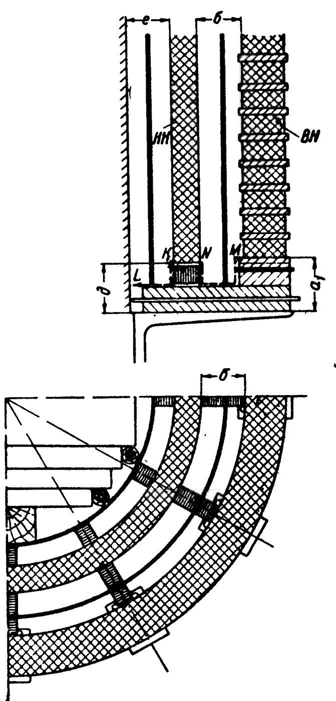
Таблица 4-1

Класс изоляции обмотки в *кв*	От 0,1 до 1	3,15	6,3	10,5	38,5	110	220
Испытательное напряжение в *кв*	5	18	25	35	85	230	460

Значения этих испытательных напряжений кладутся в основу расчета или определения, указанных на фиг. 4-1 изоляционных расстояний. Несколько далее будет также указано на то, что, кроме испытаний напряжением при 50 *гц*, обмотки подвергаются также импульсным воздействиям. Однако, так как одновременное рассмотрение условий 50-периодных и импульсных воздействий несколько затруднило бы изложение, то в дальнейшем рассматриваются условия нагрузки изоляции при 50 *гц*, а в следующем параграфе — особенности импульсных воздействий.

Детальный расчет указанных на фиг. 4-1 изоляционных расстояний в конечном итоге основывается на результатах испытаний ряда опытных образцов. Неоднородность строения диэлектриков чрезвычайно затрудняет теоретические расчеты. На самом деле, на фиг. 4-2 показано, что изоляционное расстояние *б* состоит из двух масляных каналов и изоляционного бумажно-бакелитового цилиндра в тех местах, где не проходят вертикальные рейки, дистанцирующие обмотки и цилиндры. В тех местах, где поставлены эти рейки, изоляционное расстояние состоит сплошь из различных твердых диэлектриков — цилиндра, электрокартона реек, кабельной бумаги (изоляция проводов). Равным образом изоляционное расстояние *а* состоит либо из масляных каналов и шайб из электрокартона в тех местах, где нет прокладок, либо сплошь из твердых диэлектриков там, где установлены прокладки, на которые опирается обмотка. Граница же этих двух областей обладает своими особенностями с точки зрения электрической прочности по поверхности раздела двух областей.

Помимо неоднородности диэлектриков, образующих данные изоляционные расстояния, необходимо указать на то, что само электрическое поле весьма неоднородно — имеется много острых углов, где напряженность поля должна достигать весьма больших значений.



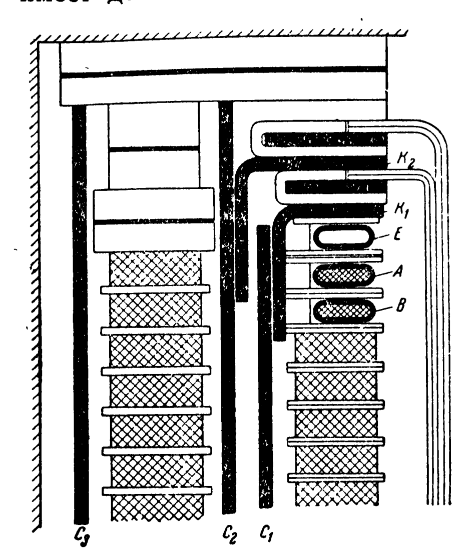
Фиг. 4-2. Пути возможных поверхностных разрядов.

Вся эта картина осложняется еще тем, что в целом ряде мест можно опасаться не только пробоя диэлектриков, но и их перекрытия. Так, кроме пробоя изоляционного расстояния *б* в виде двух масляных каналов и бумажно-бакелитового цилиндра где-либо по высоте обмотки, можно также опасаться перекрытия от точки *M* и до точки *N*, огибающего изоляционный цилиндр. Равным образом вместо пробоя изоляционного расстояния *е* может произойти перекрытие с точки *K* на сердечник в точку *L*.

Наибольшую опасность представляют собой перекрытия или поверхностные разряды с обмотки ВН на НН, т. е. с точки *M* в точку *N*. Обычно стремятся делать так, чтобы изоляционное расстояние *д* было бы незначительно меньше, чем расстояние *а* от обмотки ВН до ярма или прессующих ярмо балок. Необходимость равенства расстояний *а* и *д* диктуется условиями механической прочности обмоток при коротких замыканиях.

Как указывалось уже ранее (см. фиг. 3-20, 3-21, 3-26 и 3-27), угловые шайбы удлиняют путь поверхностного разряда и тем самым увеличивают напряжение, при котором может произойти поверхностный разряд. Поэтому угловые шайбы устанавливаются не только в секционных катушках, но и в непрерывных катушках, в особенности на рабочие напряжения 110 *кв* и выше. Так, на фиг. 4-3 показано исполнение конструкции изоляции трансформатора на рабочее напряжение 110 *кв*. Угловые шайбы K_1 и K_2 имеют толщину 8—10 *мм* и набираются из отдельных сегментов электрокартона марки ЭМТ толщиною 2 *мм*. Для образования горизонтальных частей угловых шайб делаются надрезы, которые у двух соседних слоев картона должны быть смещены, чтобы не получи-

лось сплошной вертикальной щели. Запекание шайб в пресс-формах или сборка их без опрессовки не отражаются существенно на диэлектрической прочности данного изоляционного расстояния. Путь поверхностного разряда здесь имеет довольно сложный вид — необходимо обогнуть два цилиндра и по крайней мере один вертикальный отворот угловой шайбы.



Фиг. 4-3. Детали изоляции обмотки на 110 *кв*.

При проектировании конструкции изоляции обмоток необходимо обращать внимание на изоляцию концов и регулировочных отпаек от обмотки НН в тех местах, где эти концы и отпайки выходят за пределы обмотки НН и приближаются к обмотке ВН. Эти обстоятельства иногда приводят к необходимости увеличивать изоляционные расстояния *а* и *б* фиг. 4-2.

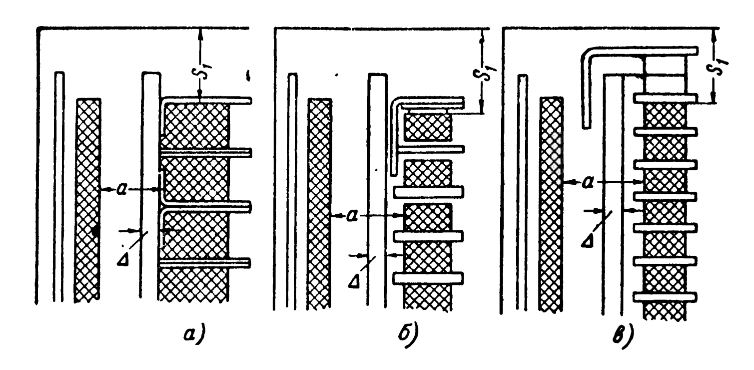
Согласно данным «Справочника по электрической изоляции», под редакцией Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева (Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 530—531) на листе 6 приложения VII приведены основные изоляционные расстояния для масляных трансформаторов. В тех случаях, когда для изоляции обмоток ВН применяются угловые шайбы, то указанные в этом приложении VII (лист 6) изоляционные расстояния могут быть уменьшены.

Принципиальное размещение угловых шайб дано на фиг. 4-4, а соответствующие им изоляционные расстояния в *мм* указаны в табл. 4-2.

Таблица 4-2

Испытательное напряжение в *кв*	Класс изоляции в *кв*	S_1	*a*	Δ	Толщина угловой шайбы
18	3	8	8	2	2,5
25	6	12	10	2	2,5
35	10	14	12	2	2,5
45	15	18	16	2	3
55	20	24	21	3	3
85	35	44	40	4	4

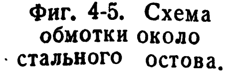
Сопоставление данных табл. 4-2 с данными, приведенными на листе 6 приложения VII, показывает, что в конструкциях с угловыми шайбами изоляционный материал значительно более напряжен из-за уменьшения расстояний. С производ-



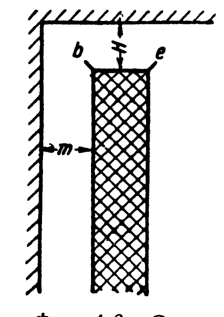
Фиг. 4-4. Обозначения основных изоляционных размеров.

ственной точки зрения конструкции с угловой шайбой значительно более трудоемки не только за счет процесса изготовления самой шайбы, но за счет общего осложнения всего узла концевых деталей обмотки, а также за счет усложнения процессов сборки и прессовки всей обмотки до и после сушки. Поэтому чаще применяют угловые шайбы только у высоковольтных трансформаторов.

Как это ранее было уже указано, концентрация силовых линий около углов обмотки (например, *a* на фиг. 4-5 или *b* — на фиг. 4-6) обуславливает то, что в этих местах изоляционные материалы будут сильно напряжены.



Фиг. 4-5. Схема обмотки около стального остова.



Фиг. 4-6 Схема обмотки в углу окна остова.

Исследования показали, что между расстоянием до ярма *H* и расстоянием *m* (фиг. 4-6) до сердечника должно быть определенное соотношение для того, чтобы изоляционные материалы не испытывали чрезмерных напряженностей. Поэтому с увеличением испытательного напряжения необходимо не только увеличить размер *H*, но и размер *m*. При конфигурации обмотки в окне трансфроматора, как это

показано на фиг. 4-6 пробивное напряжение при 50 *гц* теоретически определяется по формуле

$$U_{действ}=k\sqrt[3]{\frac{m^2}{1+\frac{m^2}{H^2}}}, \qquad (4\text{-}1)$$

где k — коэффициент, зависящий от электрической прочности материала вблизи острия. Для чистого масляного промежутка (без твердой изоляции) и технически чистого масла $k=38$—40. Размеры H и m даны в сантиметрах. Эта формула показывает, что при одинаковой напряженности в наиболее опасном месте изоляционные расстояния возрастают в степени $^3/_2$ от увеличения напряжения, т. е. при увеличении напряжения в два раза изоляционные расстояния должны возрасти, по крайней мере, в 2,83 раза, если считать, что запас прочности при испытательных напряжениях по сравнению с пробивным напряжением должен в обоих случаях оставаться неизменным, и если считать, что электрическая прочность материала вблизи острия не изменяется с повышением напряжения. Последнее допущение довольно произвольно тем более, что весь вывод формулы (4-1) сделан в предположении, что углы b идеально прямые. Поэтому теоретически напряженность поля на этих углах должна всегда равняться бесконечности и для того, чтобы обойти это неудобство, приходится вводить условные закругления углов и некоторую условную электрическую прочность материала на этих углах.



Фиг. 4-7. Схема обмотки с уступом. **Фиг. 4-8. Схема острия.**

Предыдущие выводы без большой погрешности можно распространить и на обмотки ВН, считая что заземленная обмотка НН выполняет роль вертикальных стенок на фиг. 4-5 и 4-6. На основании этих соображений можно дать теоретические обоснования для весьма често применяемой на практике уступчатой формы сечения обмоток высоковольтных трансформаторов фиг. 4-7. На основе этих теоретических соображений можно оценить, насколько увеличится электрическая прочность обмотки, если вместо простой формы сечения обмоток (фиг. 4-6) применить форму сечения с уступом (фиг. 4-7).

Для электродов, имеющих формулу, указанную на фиг. 4-8 известна следующая формула для пробивного напряжения

$$U=k\sqrt[3]{m^2}, \qquad (4\text{-}2)$$

где k имеет то же значение, что и в формуле (4-1), а m берется в сантиметрах. Такая форма электродов может чаще всего встречаться в конструкции отводов от обмоток трансформатора.

Приведенные выше теоретические соображения имеют значение с точки зрения правильного представления физической картины электрического поля обмоток. Последнее особенно важно при импульсных перенапряжениях; при 50 *гц* всегда приходится считаться с условиями чисто теплового пробоя.

Практическое применение формул (4-1) и (4-2) весьма сильно ограничивается тем, что изоляционные расстояния обычно состоят из жидких и твердых диэлектриков. Как это указывалось выше, приходится считаться с большой неоднородностью диэлектрической проницаемости в разных местах поля, а также с возможностью возникновения поверхностных разрядов.

В последние годы вновь приобретают значение сухие трансформаторы. Обмотка сухих трансформаторов должна быть весьма тщательно изолирована, ибо воздух является все же весьма ненадежным изоляционным материалом. Помимо всего этого необходимо считаться с возможностью увлажнения обмоток и разных изоляционных деталей. Поэтому для сухих трансформаторов необходимы специальная сушка и пропитка катушек противосыростными лаками.

В начальной стадии развития трансформаторостроения делались исключительно сухие трансформаторы. Они долгое время успешно конкурировали с масляными трансформаторами, так как имели лучшие технические показатели (меньшие потери), не требовали специального надзора за маслом и были менее опасны в пожарном отношении. Установка таких трансформаторов допускалась в сухих подвалах жилых домов. Зато для сухих трансформаторов требовалось большее количество трансформаторной стали и меди. Кроме того, эти трансформаторы испытывались более низкими напряжениями. Испытательное напряжение бралось равным удвоенному рабочему плюс один киловольт.

Эти старые сухие трансформаторы имели часто чередующийся тип обмотки. Особое внимание обращалось на плотное прилегание катушек друг к другу (к изоляционным шайбам) и к цилиндру. Каждая двойная катушка изолировалась лакотканью. Толщина этой катушечной изоляции для обмоток НН составляла 1—1,5 *мм* на сторону, а для обмоток на 6 *кв* — до 2—2,5 *мм* на сторону. Плотное прилегание бандажей и шайб к катушкам и друг к другу исключало возможность попадания между катушек посторонних металлических предметов, а также было необходимо для лучшей передачи тепла потерь от внутренних частей обмотки. Если наружная поверх-

ность катушек оказывалась недостаточной для отвода тепла потерь, то в промежутках между катушками ВН и НН устанавливались охладительные металлические листы, которые способствовали отводу тепла от внутренних витков катушек. Всякие воздушные каналы обычно исключались.

Производство этих трансформаторов постепенно приостановилось, как только выяснились пределы мощности и нерентабельность изготовления этих сухих трансформаторов на рабочее напряжение выше 15—20 *кв*.

В настоящее время изготовляются сухие трансформаторы преимущественно с воздушными охлаждающими каналами. На внешние катушки накладываются лишь тонкие бандажи из лакоткани и кабельной бумаги (1 слой вполуперекрышку) для защиты катушек от случайных внешних механических повреждений. Конструкции с угловыми шайбами (фиг. 4-4) позволяют получить достаточно экономные изоляционные расстояния, указанные (в *мм*) в табл. 4-3.

Таблица 4-3

Испытательное напряжение в *кв*	Класс изоляции в *кв*	S_1	a	Δ	Угловые шайбы
18	3	25	15	2,5	2,5
25	6	45	22	3	2,5
35	10	60	30	5	2 шт. по 2,5

При применении конструкции без угловых шайб необходимо увеличить размер S_1 соответственно до 35, 60 и 80 *мм*, а размер a соответственно до 18, 26, 35 *мм*. При конструировании этих трансформаторов должно быть обращено особое внимание на хороший доступ воздуха в каналы между обмотками и катушками, в особенности, если делается конструкция трансформатора с естественным воздушным охлаждением без принудительной циркуляции воздуха.

4-3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Данные о размерах основных изоляционных расстояний обмоток трансформатора позволяют достаточно точно и надежно установить то пространство, которое может занимать обмотка в окне трансформатора. Однако, большое разнообразие вопросов, возникающих при практических расчетах изоляции обмоток, побудило автора расширить содержание этой главы некоторыми сведениями о самих изоляционных мате-

риалах, что и изложено на листах 1, 2, 3, 4, 5, 6 приложения VII.

При подборе сведений об электрической прочности изоляционных материалов было обращено особое внимание на однородность источников. В основном были использованы сведения из Справочника по электрической изоляции под редакцией Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева [Л. 29], а также Труды ВЭИ, выпуск 31 — Вопросы трансформаторостроения [Л. 21], и некоторые другие источники (см. [Л. 11, 24 и 25]).

Особое внимание было обращено на подбор данных, полученных по возможности при одинаковых или близких друг к другу методах испытания. Необходимо отметить, что некоторые данные, например, касающиеся пробоя воздуха, взяты целиком из ГОСТ 1232-41. Вследствие различия методов и условий испытаний трансформаторов и тех изоляционных материалов, которые применяются при изготовлении трансформаторов, данными других ГОСТ нельзя непосредственно пользоваться при проектировании трансформаторов. Образцы картона по ГОСТ 4194-48 должны в течение 24 час. пропитываться в трансформаторном масле при 90° С. Эти условия, может быть, несколько приближаются к условиям работы картона при эксплуатации трансформатора. Но когда сам трансформатор испытывается, а это испытание трансформатора в основном означает и испытание картона в изделии, то картон уже не только пропитан в масле. Этот картон вместе с обмоткой сушится, пропитывается лаком, запекается и перед заливкой маслом снова сушится. Предварительно картон подвергается еще ряду механических операций—резке, штамповке, склейке, загибке, а пластические материалы,как лакоткани, еще скручиваются при разного рода намотках. Поэтому можно ожидать, что свойства электроизоляционных материалов в изделии могут сильно отличаться от свойств, указанных в стандартах, и в некоторых случаях электрические прочности могут оказаться ниже, чем по ГОСТ для данного материала.

Поскольку данные ГОСТ на изоляционные материалы более или менее широко известны, в данной работе было обращено особое внимание на подбор опытных данных, полученных в таких условиях, которые, по мнению специалистов, наиболее близко подходят к условиям электрической нагрузки изоляционных материалов при испытании готового трансформатора. Кроме того, там, где это представляется возможным, давались данные пробивных напряжений как при 50 *гц*, так и при импульсах.

Особо следует остановиться на изоляционных промежутках, состоящих из слоев различных (твердых и жидких) диэлек-

триков. В настоящее время установилась следующая терминология: различают покрытия и барьеры. Покрытием называют твердый диэлектрик, который плотно прилегает и имеет форму самого электрода, — так, например, изоляция на проводах является покрытием. Твердый диэлектрик, помещенный на некотором расстоянии от того или другого электрода, называют барьером.

Наиболее существенным для такого слоистого диэлектрика является вопрос распределения общего напряжения на части, приходящиеся на каждый диэлектрик в отдельности. Если x_1 и x_2—толщины слоев диэлектрика *1* и *2*, имеющих диэлектрические проницаемости ε_1 и ε_2, то общее напряжение U распределяется на U_1, приходящееся на первый диэлектрик, и U_2—на второй диэлектрик, где очевидно,

$$U_1 + U_2 = U,$$

и для случая плоского конденсатора

$$U_1 = \frac{U}{1 + \frac{x_2\varepsilon_1}{x_1\varepsilon_2}}; \quad U_2 = \frac{U}{1 + \frac{x_1\varepsilon_2}{x_2\varepsilon_1}}.$$

В простейшем случае, когда $x_1 = x_2$, получим, что

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}.$$

Так как диэлектрическая проницаемость для масла меньше, чем диэлектрическая проницаемость большинства твердых диэлектриков, применяемых в трансформаторостроении, то на слой масла придется бо̀льшее напряжение, чем на твердый диэлектрик. Масло, таким образом, при слишком толстом твердом диэлектрике нагружается сильнее, чем барьер, и толстые барьеры рекомендовать нельзя. В некоторых случаях перегрузка масла может привести к частичному пробою масляного промежутка. Оканчиваясь на барьере, эти частичные пробои повреждают поверхность барьера и при многократном повторении приведут к поверхностному разряду вокруг барьера.

Таким образом, легко прийти к выводу, что надо всячески избегать применения толстых барьеров. Тонкие же барьеры в однородных полях (плоские конденсаторы и т. п.), помещенные приблизительно на 0,5—0,6 от полного расстояния между электродами, повышают пробивное напряжение на 30—35% при 50 *гц* при полных расстояниях от 30 до 200 *мм*.

В неоднородных полях (например, при электродах: игла—плоскость) картина получается более сложной, в особенности, если барьер находится вблизи наиболее напряженного электрода. Рассмотрим случай неизменного положения барьера вблизи острия. Удаление плоскости от электрода не будет существенно влиять на повышение напряжения за барьером, между плоскостью и барьером. Поэтому повышение напряжения при удалении плоскости может привести к частичному пробою при напряжении меньшем того, при котором происходит пробой чистого масляного промежутка без барьера.

С другой стороны, напряжение полного пробоя при расположении барьера вблизи иглы становится на 80% больше напряжения полного пробоя чистого масляного промежутка при расстояниях от 50 до 150 *мм*. Однако, это повышение пробивного напряжения не может быть использовано в конструкции, так как напряжение частичного пробоя будет задавать предел возможного повышения напряжения. Напряжение частичного пробоя повышается по мере удаления барьера, и при удалении барьера на 0,5—0,6 от полного расстояния напряжение частичного пробоя становится несколько выше пробивного напряжения без барьера. Таким образом, в неоднородных полях эффект барьера значительно ниже (учитывая частичные разряды), чем в однородных полях.

Считают, что при импульсных воздействиях влияние барьеров оказывается меньше, чем при 50 *гц*. Так, А. В. Панов и А. В. Сапожников в «Справочнике по электрической изоляции» [Л. 29] указывают, что при расстоянии в 50 *мм* при расположении барьеров на расстоянии, равном 25% от общего расстояния, прочность увеличивается примерно на 25%, а при непосредственном прилегании барьера к стержню пробивное напряжение повышается примерно на 50%.

Что же касается покрытий, то их влияние особенно сильно сказывается при 50 *гц* и средних качествах масла. Покрытия затрудняют образования в электростатических полях проводящих цепочек, которые сильно понижают пробивное напряжение. Эти единичные пробои тоже крайне нежелательны.

Всякое потрескивание и шумы, сопутствующие частичным пробоям или перекрытиям при испытаниях трансформатора, уже заставляют считаться с возможностью перехода со временем этих частичных явлений в полные пробои.

Явления поверхностного разряда в настоящее время исследованы еще недостаточно полно. Но все же установлено, что нашедший в свое время метод простого сложения всех отрезков извилистого пути возможного поверхностного разряда и оценка прочности этого пути при помощи деления напряжения на это суммарное расстояние не может даже в отдаленной

степени отражать действительных закономерностей поверхностного разряда.

Наиболее устойчивые данные получаются в тех случаях, когда путь поверхностного разряда совпадает с направлением силовой линии. Однако, и в этих случаях большое значение имеет состояние самой поверхности (шероховатости, загрязнение и т. п.), а также отсутствие острых углов у электродов. В тех случаях, когда путь поверхностного разряда идет не вдоль силовых линий, а приближенно вдоль эквипотенциальных поверхностей, можно ожидать сравнительно низких пробивных напряжений. В этих случаях коронирование и появление скользящих разрядов у острых углов электродов приводит в конечном итоге к перекрытиям весьма больших расстояний.

4-4. ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Перенапряжения на зажимах трансформатора особенно сильно начали проявляться в эксплоатации по мере роста рабочих напряжений и мощности сетей. В начале первых стадий развития трансформаторостроения, когда приходилось строить трансформаторы на невысокие напряжения, можно было сравнительно легко конструировать обмотки с достаточными запасами электрической прочности изоляции. В этих условиях борьба с неизбежными перенапряжениями велась, так сказать, наощупь. Первоначальный опыт эксплоатации, а также конкуренция различных фирм между собой привели в конечном итоге к установлению каких-то норм испытательных 50-периодных напряжений. Повышение испытательных напряжений было одним из способов устранения мелких конкурентов. Но когда многие конкуренты были устранены, а эксплоатация требовала трансформаторов с более высоким рабочим напряжением, для которых было значительно труднее получить прежние запасы электрической прочности изоляции, то пришлось пойти на меньшие кратности испытательных напряжений по отношению к рабочим напряжениям. Германские нормы 50-периодных испытательных напряжений особенно характерны в этом отношении: сначала испытательное напряжение равно 3,25-кратному рабочему напряжению. Далее эта кратность падает, и когда пришлось строить 100-киловольтные трансформаторы, то испытательное напряжение пришлось взять равным двухкратному значению рабочего напряжения.

Начиная с двадцатых годов, широкое распространение получает электронный осциллограф. Большая чувствительность к электрическим и магнитным полям при полной почти безинерционности электронного луча позволили применить электронный осциллограф для исследования явлений перенапряжений. Изучение перенапряжений в обмотках трансформа-

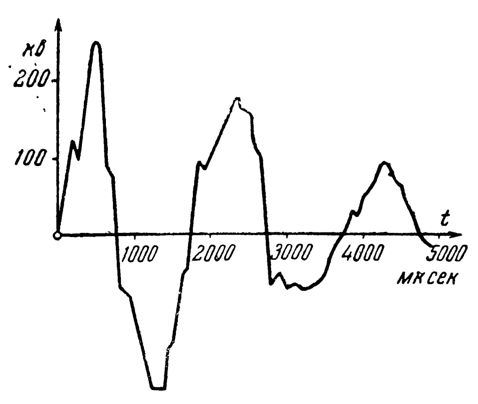
торов, а также изучение работы защиты от перенапряжений подстанций и изучение действия разрядников, выключающих аппаратов и тому подобных процессов особенно широко развернулось в Москве, Ленинграде и несколько позже в Харькове. Наши профессора — Сиротинский, Смуров, Карасев, — научные работники — Панов, Назаров, Архангельский и ряд других товарищей — произвели большое число теоретических и экспериментальных работ в области перенапряжений в обмотках трансформаторов. Одновременно на заводах электропромышленности производилась теоретическо-конструктивная разработка наиболее прочных и простых типов обмоток. В результате этих работ лауреатами Сталинских премий инженерами Рабиновичем, Кронгаузом, Перлиным, Чертиным и Гельпериным была предложена и внедрена конструкция грозоупорных обмоток высоковольтных трансформаторов, во многих отношениях превосходящая известные до сих пор типы обмоток различных заграничных фирм.

Объем данной книги не позволяет более подробно остановиться на этих важных теоретических и расчетно-конструкторских расчетах. Несмотря на весьма широкий размах этих работ, все же приходится сказать, что сейчас еще нельзя дать строго теоретических расчетов электрической прочности обмоток трансформаторов. Отдельные вопросы разработаны теоретически весьма детально, но следующие смежные с ними вопросы пока еще не получили теоретического решения и потому переход к этим вопросам и их решение получаются при помощи опытных коэффициентов. Во многих случаях накопление статистических опытных данных представляет собой весьма существенный этап этих работ.

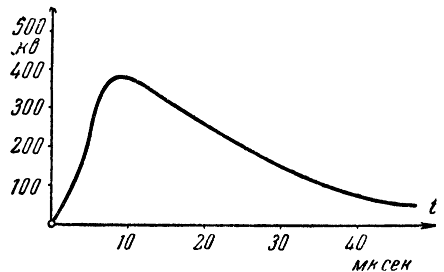
Кратко суммируя результаты многочисленных работ, можно сказать, что характер возникающих в эксплоатации перенапряжений очень разнообразен. Однако, грубо говоря, эти перенапряжения удается легко классифицировать, исходя из причин возникновения перенапряжений. Различают атмосферные перенапряжения и коммутационные. Статистические данные показали, что амплитуда коммутационных перенапряжений не превосходит 3—4-кратного значения амплитуды фазового напряжения. Основная волна этих перенапряжений представляют собой быстро затухающие колебания с периодом в несколько сот или тысяч микросекунд. Форма этих колебаний искажается еще наложенными колебаниями более высоких частот. Практически затухание этих колебаний происходит в течение одного полупериода промышленной частоты.

Атмосферные перенапряжения обычно вызывают апериодические волны, форма которых, однако, часто искажается наложенными высокочастотными колебаниями. На фиг. 4-9, 4-10, 4-11 показаны эти три вида волн, которые приводит проф.

Г. Н. Петров, как наиболее характерные случаи этих трех видов перенапряжений. Амплитуда волн атмосферных перенапряжений может быть больше амплитуды коммутационных перенапряжений, но затухание волн атмосферных перенапряжений происходит в пределах нескольких единиц, десятков, реже одной, двух сотен микросекунд. Вообще формы волн атмосферных перенапряжений могут быть весьма разнообразны. Амплитуда и форма волны перенапряжения, проникающей в обмотки трансформатора, в весьма сильной степени зависит от того, как далеко место атмосферного разряда или иного повреждения на линии от трансформатора, какая имеется защита подстанции и подходов к ней, произошел ли срез волны или нет и тому подобных причин.



Фиг. 4-9. Форма кривой колебательного импульса.



Фиг. 4-10. Форма апериодической волны.

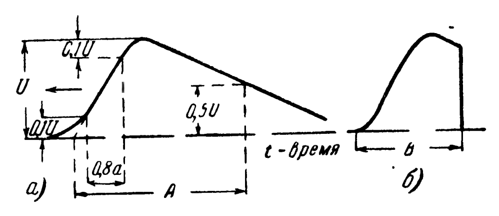


Фиг. 4-11. Волна импульса с высокочастотными колебаниями.

Очевидно, что не только электрическая прочность трансформатора при импульсных воздействиях, но также электрическая прочность всех аппаратов, изоляторов и прочего оборудования распределительных устройств имеет существенное значение для надежной эксплоатации. Для того, чтобы воспрепятствовать проникновению на подстанцию слишком высоких волн перенапряжений, были разработаны специальные конструкции защитных аппаратов. Возник даже новый термин «координация изоляции», означающий согласование

напряжений, при которых начинают действовать защитные устройства, с пробивными напряжениями защищаемой аппаратуры, а также с пробивными напряжениями разных аппаратов или элементов конструкции, которые находятся на пути движения волн.

Это согласование электрической прочности различных аппаратов подстанции возможно, конечно, в том случае, если все эти аппараты испытываются волной одной и той же формы. На фиг. 4-12,*а* показана форма волны, которая принята теперь для испытания трансформаторов и другой аппаратуры подстанций. Так как начало кривой и абсциссу максимума волны трудно установить точно на осциллограмме, то *а* — длительность фронта—находят путем указанного на фиг. 4-12 построения; расстояние между абсциссами точек, соответствующих значениям 0,1 и 0,9 от *U* — амплитуды волны,— считают равным 0,8 *а*, т. е. 0,8 длина фронта. Импульсные испытания производят волной, у которой *а* = 1,5 *мксек*, а *А* = 40 *мксек*. Кроме того, испытания производятся еще срезанными волнами, у которых запаздывание среза происходит через *b* = = 2 *мксек* (4-12,*б*).



Фиг. 4-12. Формы стандартных волн.
а — полная волна; *б* — срезанная волна.

Наибольшее распространение получил малоударный метод (трехударный) испытания волнами указанной формы. Значения *U* — амплитуды волны — пока еще не вполне согласованы. Московский трансформаторный завод считает, что амплитуды волн, указанные в Справочнике по электрической изоляции под редакцией Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева, следовало бы несколько изменить, учитывая фактически достигаемые уровни электрической прочности изоляции типовых конструкций трансформаторов. Эти значения приведены в табл. 4-4.

Ранее уже указывалось, что электромагнитные явления, происходящие в обмотках трансформаторов при импульсных воздействиях, точной математической обработке поддаются лишь в весьма ограниченном числе случаев. В этих случаях обычно предполагается, что волна имеет отвесный фронт и бесконечно длинный хвост (фиг. 4-13), а обмотка с точки зрения внешних и внутренних емкостей и индуктивных сопротивлений имеет равномерное строение.

Как показывают эти теоретические работы и результаты опытов в первый момент падения волны на трансформатор

Таблица 4-4

Рекомендуемые значения $U_{макс}$ амплитуд волн при импульсных испытаниях обмоток трансформаторов

Класс изоляции в *кв*	$U_{макс}$ в *кв* (трехударный метод испытания)	
	Полная волна 1,5/40 *мксек*	Срезанная волна 2 *мксек*
3	54	63
6	73	80
10	97	110
15	118	132
20	137	155
35	205	225
110	510	630
154	690	870
220	980	1 150

обмотку трансформатора следует рассматривать как цепочку емкостей C и K (фиг. 4-14), считая, что витки обмотки образуют отдельные независимые круги. В этом случае напряжение отдельного элемента обмотки с изолированной нейтралью выражается формулой

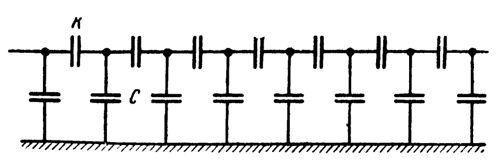
$$U_x = \frac{\operatorname{ch} \alpha x}{\operatorname{ch} \alpha} U, \qquad (4\text{-}3)$$

где U — напряжение фронта волны (фиг. 4-13);

Фиг. 4-13. Волна с круглым фронтом.

$$\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}}; \qquad (4\text{-}4)$$

C и K — см. фиг. 4-14, а x — расстояние рассматриваемого элемента от конца обмотки в долях от полной длины l обмотки;



Фиг. 4-14. Схема обмотки в виде цепочки емкостей.

ch называется гиперболическим косинусом и представляет собой функцию от αx или α следующего вида:

$$\operatorname{ch} \alpha = \frac{e^{\alpha} + e^{-\alpha}}{2}.$$

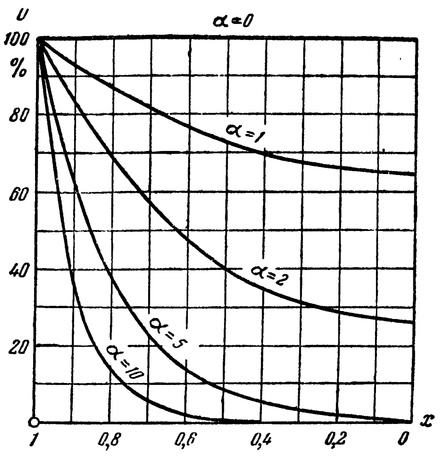
Далее будет введена функция гиперболический синус, которая определяется так

$$\operatorname{sh} \alpha = \frac{e^{\alpha} - e^{-\alpha}}{2}.$$

Значения функций можно брать из таблиц, помещенных в математических справочниках, так же как и значения кругового синуса и косинуса. Для обмотки с глухозаземленной нейтралью напряжение U_x отдельного элемента обмотки выражается формулой

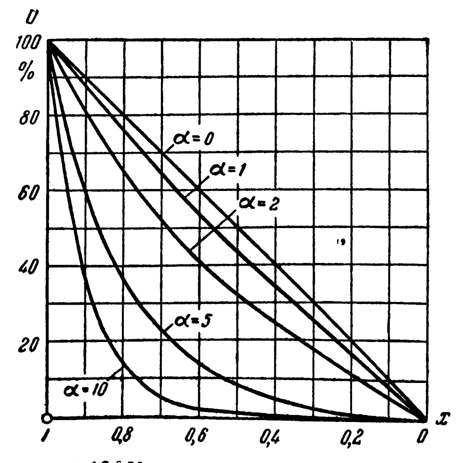
$$U_x = \frac{\operatorname{sh} \alpha x}{\operatorname{sh} \alpha} U, \qquad (4\text{-}5)$$

здесь α, x и U имеют те же значения, что и для обмотки с изолированной нейтралью. На фиг. 4-15 и 4-16 показаны кривые для U_x при разных значениях α для обмоток с изолированной и с глухозаземленной нейтралью.



Фиг. 4-15. Кривые первоначального распределения для обмоток с изолированной нейтралью.

Для обмотки с изолированной нейтралью конечное распределение волны вдоль обмотки надо было бы представить в виде прямой линии, параллельной оси абсцисс, так как в этом случае все элементы емкости обмотки имели бы одно и то же напряжение. Это распределение соответствует, таким образом, кривой для $\alpha = 0$ (фиг. 4-15).



Фиг. 4-16. Кривые первоначального распределения для обмоток с заземленной нейтралью.

Для обмотки с глухозаземленной нейтралью конечное распределение напряжения надо было бы представить в виде прямой линии для $\alpha = 0$ (фиг. 4-16). Таким образом, чем меньше α, тем лучше начальное распределение приближается к конечному. В обычных трансформаторах $\alpha = 5 \div 15$, т. е. приходится считаться с тем, что первоначальное распределение напряжения весьма сильно отличается от конечного, а потому следует ожидать дальнейшего переходного состояния.

Кроме того, можно сделать еще другой весьма важный вывод, что в обычных трансформаторах при первоначальном распределении получается очень большое падение напряжения на первых витках. Очевидно, наибольшее падение напряжения будет на первом элементе ($x_1 = l$) и, следовательно, если $x_1 = xl$ для обмотки с изолированной нейтралью

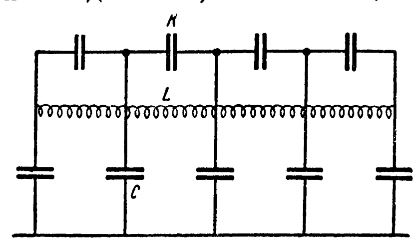
$$\left(\frac{dU_x}{dx_1}\right)_{x_1=l} \approx a\frac{U}{l}, \tag{4-6}$$

а для обмоток с глухозаземленной нейтралью

$$\left(\frac{dU_x}{dx_1}\right)_{x_1=l} \approx a\frac{U}{l}. \tag{4-7}$$

Таким образом, видно, что параметр a показывает, во сколько раз падение напряжения при первоначальном распределении превышает падение напряжения при равномерном распределении напряжения по всей длине обмотки. Условия на нейтрали обмотки при этом безразличны.

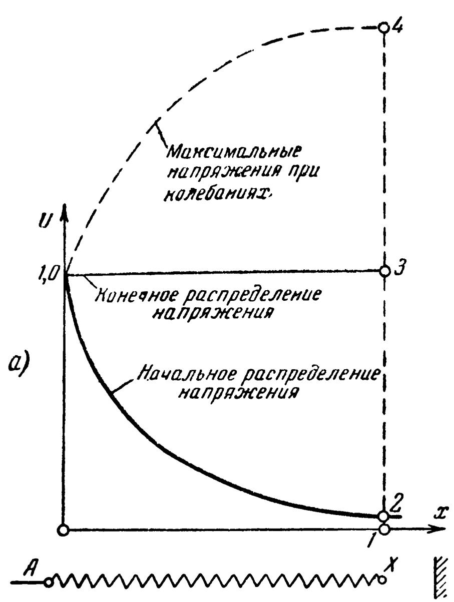
Общие теоретические соображения, подтверждаемые опытными данными, показывают, что первоначальное распределение переходит в конечное не плавно, а после некоторого колебательного процесса, в котором принимают участие не только емкости элементов, но также и самоиндукции. Обмотку приходится в первом и, надо сказать, весьма далеком приближении, представлять в виде элементов емкости K и C и самоиндукции L (фиг. 4-17). Вся трудность теоретического исследования переходных процессов заключается в правильной оценке индуктивности L, в которой должны быть отражены не только собственная индуктивность витка, но взаимоиндукция хотя бы соседних витков, а также взаимоиндукция экранов в виде обмотки низшего напряжения или стали сердечника.



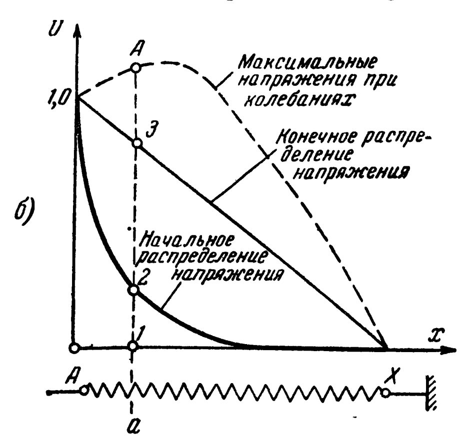
Фиг. 4-17. Схема обмотки в виде цепочки индуктивностей и емкостей.

Переходя от теоретических соображений к реальным обмоткам, легко видеть, что для непрерывных обмоток нельзя дать такого четкого разделения емкостей K и C, как это сделано на схеме фиг. 4-17. В непрерывной, например, обмотке каждый виток имеет емкостную связь не только с соседними витками той же катушки, но и с витками других катушек. Непосредственную же емкостную связь с землей (баком и обмоткой НН) имеют лишь крайние витки катушек. Кроме того,

имеются неизбежные неравномерности в строении обмоток в виде концевых катушек с усиленной изоляцией, регулировочных витков и т. п. Об особенностях магнитных полей при перенапряжениях только что говорилось несколько выше. Поэтому приходится обращаться к опытным данным. На фиг. 4-18 а и б показаны для волн по фиг. 4-12 огибающие кривые напряжений в катушках обмоток трехфазных трансформаторов (при падении волн по трем проводам). Они дают значения наибольшего напряжения в любой катушке обмотки, которое было когда-либо достигнуто в течение всего переходного процесса. Следовательно, соседние точки на этой кривой могли получиться в самые различные моменты времени и потому этими кривыми нельзя пользоваться для определения падений напряжений (градиентов) между соседними катушками. Для однофазных трансформаторов с изолированной нейтралью вместо кривой по фиг. 4-18 можно руководствоваться кривой фиг. 4-19.



Фиг. 4-18а. Кривые начального и конечного распределений напряжения для обмотки с изолированной нейтралью.



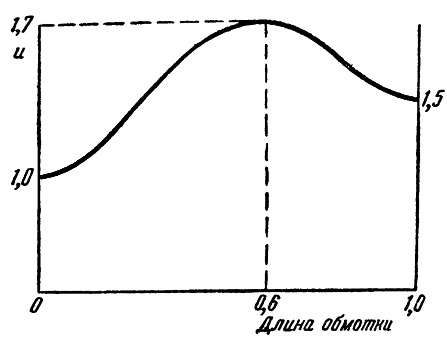
Фиг. 4-18б. Кривые начального и конечного распределений напряжений для обмотки с заземленной нейтралью.

Рассматривая эти кривые, можно прийти к выводу, что напряжения на изолированной нейтрали могут быть значительно больше, чем напряжения падающей на трансформатор волны. Так, для трехфазных трансформаторов это напряжение на нейтрали может достигнуть 190% от падающей волны, правда для

наиболее тяжелого случая, когда по всем трем проводам одновременно приходит волна со 100% амплитудой. Для однофазных трансформаторов наибольшее напряжение получается где-то в середине обмотки (60% от начала) и достигает там значения порядка 170%, а на нейтрали падает до 150% от напряжения волны.

Для обмоток с заземленной нейтралью где-то вблизи начала обмотки можно ожидать напряжения порядка 120—130% от напряжения падающей волны (фиг. 4-19).

Необходимо иметь в виду, что эти перенапряжения, указанные на кривых фиг. 4-18 и 4-19 длятся 2—3 *мксек*, хотя падающая волна 1,5/40 *мксек* имеет сравнительно длинный хвост. Поэтому, если оставить в стороне сравнительно редко встречающийся случай изолированной нейтрали и падения полной волны по трем проводам, можно прийти к выводу, что во время переходного режима перенапряжения отдельных катушек не вызывают особенно большой нагрузки на главную изоляцию обмотки. Для обычных обмоток на напряжение 35 и 110 *кв*, для которых получены кривые фиг. 4-18 и 4-19, внутренние катушки, на которые приходятся повышенные напряжения, имеют обычно достаточный запас электрической прочности.

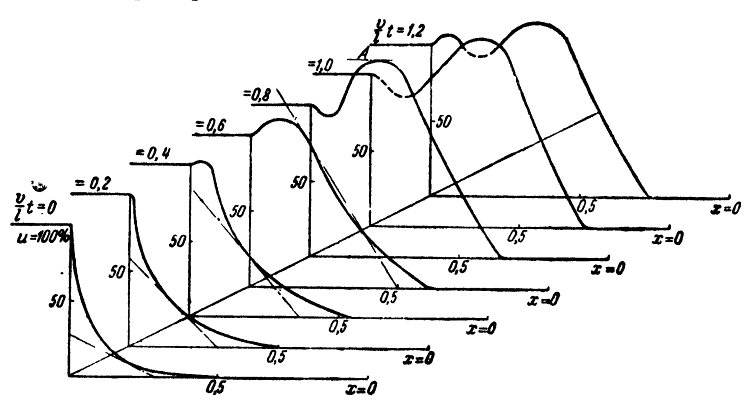


Фиг. 4-19. Кривая максимальных напряжений в обмотке с изолированной нейтралью.

Поэтому, например, когда производится испытание импульсной прочности модели главной изоляции обмотки, то в опытной модели приходится дополнительно весьма сильно увеличивать пробивную прочность концевых катушек, если необходимо знать, при каком напряжении произойдет пробой главной изоляции где-либо в середине высоты обмотки.

Однако, следует обращать внимание не только на то, какое значение напряжения получила та или иная точки обмотки в разные моменты времени переходного процесса, но необходимо следить также за тем, какое падение напряжения получается между соседними катушками или витками (так называемые „градиенты"). Если вернуться к общим теоретическим расчетам значений напряжений в разных точках обмотки, то можно составить пространственную диаграмму, показанную на фиг. 4-20. На этой диаграмме показана начальная стадия изменения первоначального распределения

$\left(\frac{v}{l}t=0\right)$. Вдоль оси $\frac{v}{l}t$, идущей под углом к x пространственной оси x, отмечаются различные моменты времени в некоторых относительных единицах $\frac{v}{l}t$, а по вертикалям откладываются напряжения. Таким образом, получается некоторое представление о том, как с течением времени постепенно изменяет вдоль обмотки свою форму кривая первоначального распределения. Угол наклона касательной в той



Фиг. 4-20. Диаграммы постепенного изменения формы кривой первоначального распределения.

или иной точке этих кривых пропорционален градиенту в этой точке в тот или иной момент времени.

На этой пространственной диаграмме легко видеть, что наибольшие напряжения и наибольшие градиенты в заданной точке могут быть в разные моменты времени. Так, на кривой пространственного распределения напряжения в момент $\frac{v}{l}t=0{,}8$ точка A с координатой $x=0{,}8$ имеет приблизительно наибольшее напряжение ($U=130\%$). Но градиент в этой точке и в этот момент равен нулю (касательная горизонтальна). На первых четырех кривых для моментов времени $\frac{v}{l}t=0$; $=0{,}2$; $=0{,}4$ и $=0{,}6$ приведены касательные в точке $x=0{,}8$. Угол наклона касательных для точки $x=$ $=0{,}8$ оказывается наибольшим где-то около момента времени $\frac{v}{l}t=0{,}5$. Этот градиент значительно больше градиента при первоначальном распределении напряжения $\left(\frac{v}{l}t=0\right)$.

На электрическую прочность изоляции между смежными катушками или витками влияют именно эти разности напря-

жения, т. е. градиенты. Так как смежные катушки или витки находятся достаточно близко друг к другу, то градиенты, опасные для изоляции смежных катушек или витков могут получиться в те моменты времени, когда напряжения в этих точках относительно невелики. Если эти градиенты будут достаточно велики, то получаются частичные пробои между смежными катушками и витками. Эти пробои могут привести к короткому замыканию витков или катушек уже для токов промышленной частоты и к полному выходу из строя всей обмотки.

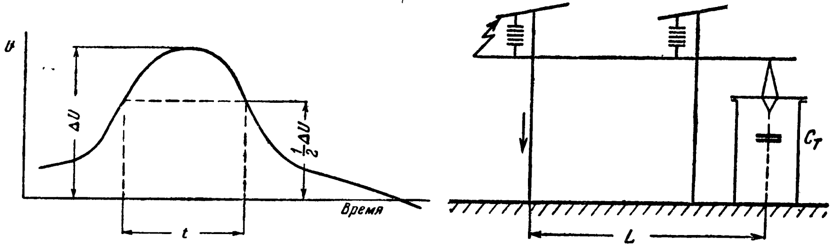
К тем трудностям, которые возникают при оценке напряжений переходных процессах, о чем уже ранее говорилось, в данном случае при оценке междукатушечных напряжений добавляются еще чисто вычислительные трудности в виде медленной сходимости рядов, дающих градиенты в той или иной точке обмотки. Поэтому при расчетах приходится пользоваться опытными данными.

Согласно этим опытным данным наибольшие градиенты, т. е. напряжения между двумя соседними катушками значительно ниже, чем наибольшие градиенты первоначального распределения при падении волны с отвесным фронтом. Кроме того, при полной волне 1,5/40 *мксек* наибольшие градиенты сдвигаются несколько в глубь обмотки. Так, при отвесном фронте волны наибольшее напряжение между двумя катушками (градиент) будет между первой и второй катушками, т. е. на первом канале. Оно равно 50—60% от полного напряжения волны для непрерывных обмоток и поднимается до 65—70% для секционных катушек. Эти цифры довольно хорошо совпадают с результатами емкостных расчетов первоначального распределения.

Для полной волны наибольшие градиенты наблюдаются на третьем — седьмом канале от начала обмотки. Кроме того, на первых трех — четырех каналах от нейтрали также появляются повышенные градиенты. Для непрерывных обмоток при полной волне наибольшие градиенты в начале обмотки (на третьем — седьмом канале) равны 20—30%, а для секционных обмоток 50—60% от амплитуды волны. Повышенные градиенты на нейтрали приближенно составляют 75% от только что указанных значений. Эти значения градиентов как у начала обмотки, так и у нейтрального конца почти не зависят от того, заземлена ли нейтраль или глухо изолирована. Для промежуточных каналов наибольшие градиенты (так сказать огибающая кривая градиентов) более или менее равномерно понижаются по направлению к нейтрали, но наблюдаются небольшие повышения градиентов на разрывах обмоток в области регулировочных катушек. В этом отношении обычно любое изменение строения обмоток отражается в виде изменения формы огибающей кривой наибольших градиентов.

Эти наибольшие напряжения между двумя соседними катушками имеют форму пиков со сравнительно небольшой длительностью. Так, если за длительность пика считают время между двумя моментами, когда градиент равен половине амплитуды ΔU (фиг. 4-21), то для непрерывных обмоток эта длительность равна 2—3 *мксек*, а для секционных обмоток 15—20 *мксек*.

Ранее уже указывалось, что, помимо испытаний полной волной 1,5/40 *мксек*, исследуется также влияние на обмотку трансформатора срезанной волны при запаздывании среза на 2 *мксек*. Срез волны — частое явление на практике, вызываемое перекрытием на линии вблизи трансформатора (фиг. 4-22).



Фиг. 4-21. Форма промежуточного пика напряжения.

Фиг. 4-22. Схема подхода линии к трансформатору.

Перекрытие гирлянды изолятора или работа разрядника или какой-либо иной пробой на землю происходят обычно в тот момент, когда фронт перенапряжения уже прошел место пробоя.

Так как для воздушной линии можно считать, что скорость движения волны равна приблизительно 300 *м* в 1 *мксек*, то запаздывание в 2 *мксек* означает, что начало волны ушло от места пробоя на 600 *м* (фиг. 4-23).

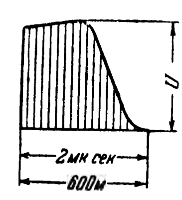
Если волна уже проникла в глубь обмотки трансформатора, то образуется колебательный контур из емкости трансформатора C_T и самоиндукции петли L между трансформатором и местом перекрытия на землю. Поэтому, начиная с момента перекрытия на землю, на трансформаторе появятся высокочастотные колебания, определяемые входной емкостью трансформатора и самоиндукцией петли L.

Если место пробоя удалено от трансформатора, например, всего на 30—40 *м*, то в трансформаторе начавшиеся переходные процессы от полной волны внезапно, например через 2 *мксек*, обрываются в момент среза волны и начинается колебательный процесс (фиг. 4-24).

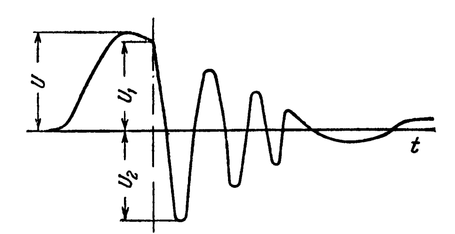
Явление среза волны тем опасно, что новое распределение потенциалов и, следовательно, градиентов появится под действием волны с фронтом U_1+U_2 (фиг. 4-24), т. е. превышаю-

щим амплитуду U полной волны. Чем ближе к трансформатору место среза, тем больше обратный пик U_2 и потому перекрытие входных изоляторов трансформатора является наиболее опасным для трансформатора. Равным образом опасно перекрытие на нейтрали трансформатора.

Опытные данные показывают, что при срезе вблизи трансформатора наибольшие градиенты появляются на 1 канале, но значение градиентов (напряжений между двумя соседними катушками) равно 90—95% от амплитуды волны в момент среза. В случае, если место среза волны удалено примерно на 30 *м*, то можно считать, что наибольшие градиенты появятся где-



Фиг. 4-23. „Запаздывание" среза.



Фиг. 4-24. Форма волны при срезе.

нибудь в пределах первых пяти каналов между катушками. Распределение градиентов на остальных каналах внутри обмотки происходит приближенно по наклонной прямой, считая, что у нейтрали наибольшее напряжение между последними катушками равно 5% от амплитуды волны в момент среза.

Разрывы около регулировочных катушек тоже вызывают местные повышения наибольших градиентов.

Срезы на нейтрали дают распределение градиентов, являющееся зеркальным отображением градиентов при срезе на линии. Следовательно, они будут наибольшими на последнем канале у нейтрали, достигая примерно или даже несколько больших значений 90—100% от амплитуды волны в момент среза. Тогда на линейном конце на первом канале напряжение между соседними катушками будет равно 5% от амплитуды волны в момент среза.

Длительность (см. фиг. 4-21) пика градиента при срезе обычно меньше, чем при полной волне. Точные измерения этих длительностей сопряжены с большими трудностями. Считают, что эти длительности порядка 0,2—до 0,9 *мксек*. Однако, расчет рекомендуется вести на длительность 2 *мксек*.

При расчетах импульсных воздействий на междукатушечную изоляцию, т. е. градиентов, следует иметь в виду данные табл. 4-4, т. е. учитывать, что испытание на срезанную волну производится при более высоких напряжениях.

Как показали данные опытов, в слоевых обмотках, применяемых для мелких распределительных трансформаторов на классы изоляции 6 и 10 *кв*, первоначальное распределение соответствует значениям α близким к нулю. Так, при изолированной нейтрали при падении волны 1,5/40 *мксек* по трем проводам напряжение на нейтрали составляет при первоначальном распределении 75% от амплитуды падающей волны и во время последующего переходного процесса максимальное напряжение на нейтрали равно 1,05—1,09 от амплитуды падающей волны. Таким образом, как напряжения, так и градиенты сравнительно невелики. Эта картина первоначального распределения мало изменяется от того, будет ли волна подана на внешний слой обмотки или на внутренний. Но при последующем переходном процессе более низкие градиенты получаются при подаче волны на внутренний слой обмотки.

Эти благоприятные условия, в силу которых слоевые обмотки распределительных трансформаторов иногда называют слаборезонирующими обмотками, позволяют весьма просто осуществлять изоляцию проводов и слоев обмотки. Применение экранов оказалось излишним для классов напряжения 6 и 10 *кв*. Введение экранов потребуется лишь для более высоких классов напряжения.

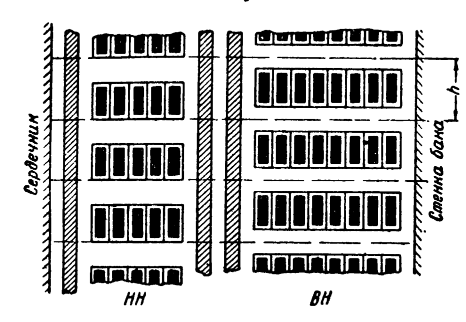
4-5. ЕМКОСТНЫЙ РАСЧЕТ

Следует отметить, что емкостный расчет является обычно одним из самых последних этапов расчета. Необходимо перед началом расчета установить, пользуясь справочными таблицами приложения VII (лист 6) и указаниями § 4-2, основные изоляционные расстояния обмоток. Равным образом на основании общих указаний, сделанных в данной книге для ряда примеров, необходимо установить общие данные для внутренней изоляции, как-то: для толщины изоляции проводов, размеров каналов между катушками, толщины междуслойной изоляции и т. п. В целом ряде случаев эти размеры определяются не по соображениям электрической прочности, а по условиям охлаждения обмоток, механической прочности изоляции и т. п. Поэтому, если требуется произвести расчет трансформатора на класс изоляции ниже 35 *кв*, весь этот параграф можно спокойно опустить. Ряд указаний для выбора изоляционных расстояний дан в главе 3 «Обмотки трансформаторов», а также в приложении VII.

Емкостный расчет удобнее всего производить после расчета основных технических данных трансформатора, т. е. тогда, когда тот или иной вариант уже принят. Обмотка трансформатора представляет собой сложную цепочку емкостей и индуктивностей. Однако, емкостной расчет основан на очень про-

стом представлении электростатического поля. Этот способ расчета был введен проф. Г. Н. Петровым и проф. В. А. Карасевым [Л. 2 и 18]. Несмотря на введенные ими упрощения картины электростатического поля, результаты расчетов хорошо совпадают с данными опытов.

Как уже указывалось ранее (фиг. 4-14 и 4-17), емкостные цепочки, изображающие обмотки, состоят из емкостей двух видов—емкости на землю и емкости между катушками, слоями или витками. Схематически некоторая часть обмотки показана на фиг. 4-25. Обе обмотки показаны, как состоящие из дисковых катушек, т. е. это могут быть непрерывные, спиральные и дисковые обмотки. Без большого труда можно представить себе аналогичный элемент трехобмоточного трансформатора. Показанную на фиг. 4-26 часть обмотки можно упрощенно представить в виде системы емкостей фиг. 4-26. Эти емкости получаются, если по высоте и ширине обмотку разделить на ряд прямоугольников и считать, что все поле состоит из плоских конденсаторов. Для подсчета емкостей на сердечник и на бак обмотку разбивают на зоны, высотою h (фиг. 4-25,4-26). Емкости C_2 между витками обмотки ВН определяются толщиной изоляции провода и высотой неизолированного провода, а емкости C_1 определяются расстоянием между проводами и радиальным размером провода с изоляцией. Емкости $C_{ВН}$ и $C_{НЗ}$ обозначают емкости одной катушки высшего напряжения (ВН), т. е. зоны высотой h *см* до обмотки низшего напряжения НН и емкость зоны высотой h от обмотки НН до сердечника.



Фиг. 4-25. Условная схема обмоток для емкостного расчета.

Каждая из этих емкостей подсчитывается по формуле для плоского конденсатора

$$C = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{\pi \cdot d \cdot h \cdot \varepsilon}{4\pi \cdot l} \text{ (фарад)}, \qquad (4\text{-}8)$$

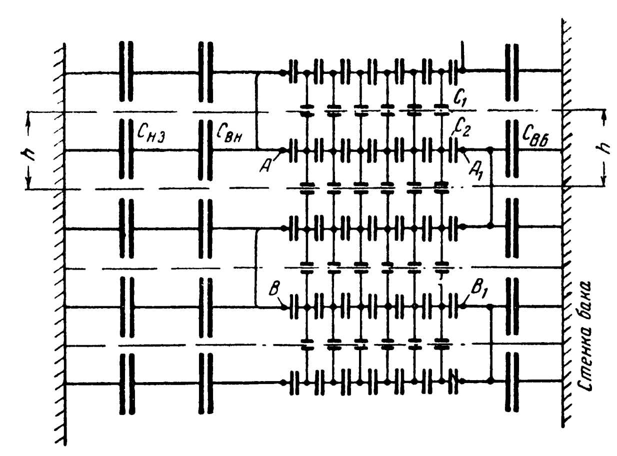
здесь ε — диэлектрическая проницаемость изоляционного материала;

l — расстояние между обкладками конденсаторов;

d — средний диаметр зоны (все размеры берутся в *см*).

Не вдаваясь в подробности подсчетов значений ε, l и d, можно сказать, что даже при такой упрощенной картине

электростатического поля емкостный расчет потребовал бы слишком много вычислительной работы. Проф. Карасев предложил упростить расчет системы емкостей C_1 и C_2, предположив (фиг. 4-26), что через середины всех конденсаторов C_1



Фиг. 4-26. Схема цепочек конденсаторов высоковольтной обмотки.

одного канала проходит эквипотенциальная поверхность, показанная пунктирной линией, совпадающая с границей зоны h. Так как все C_1 равны между собой и все C_2 тоже равны между собой, то емкость K_1 цепочки между эквипотенциальными поверхностями может быть вычислена по формуле

$$K_1 = sC_1\left[1 + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}\,\frac{1 + \operatorname{ch} 2s\sqrt{\frac{C_1}{C_2}}}{s \cdot \operatorname{sh} 2s\sqrt{\frac{C_1}{C_2}}}\right], \tag{4-9}$$

где s—число проводов в катушке. Приближенно, если

$$2s\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \geqslant 3,$$

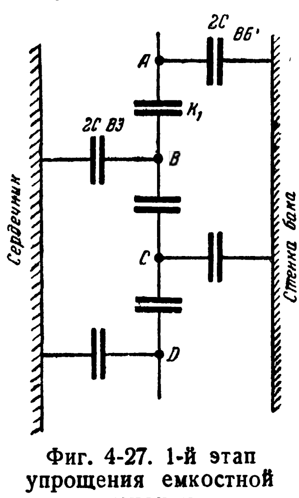
$$K_1 \approx sC_1\left(1 + \frac{1}{s}\sqrt{\frac{C_2}{C_1}}\right). \tag{4-10}$$

В том случае, если по обе стороны от катушки имеются различные каналы с емкостями C_1' и C_1'', то в формулы (4-9) и (4-10) вместо C_1 надо подставить среднее значение из емкостей каналов, т. е. $\frac{1}{2}(C_1' + C_1'')$,

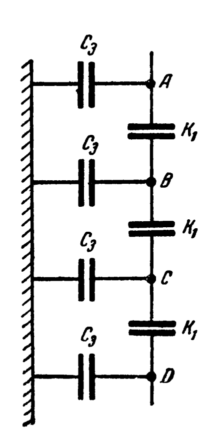
С другой стороны, обычно $C_{вз}$ — результирующую емкость последовательно соединенных емкостей $C_{нз}$ и $C_{вн}$ находят из условия

$$\frac{1}{C_{вз}}=\frac{1}{C_{нз}}+\frac{1}{C_{вн}} \tag{4-11}$$

Если же между обмоткой ВН и НН есть еще обмотка среднего напряжения СН, то мы будем иметь последовательно



Фиг. 4-27. 1-й этап упрощения емкостной цепочки.



Фиг. 4-28. 2-й этап упрощения емкостной цепочки.

соединенными емкости $C_{вс}$ между ВН и СН, $C_{сн}$—между СН и НН и $C_{нз}$ между НН и стержнем. Тогда

$$\frac{1}{C_{вз}}=\frac{1}{C_{вс}}+\frac{1}{C_{сн}}+\frac{1}{C_{нз}}. \tag{4-12}$$

Обе эти формулы умышленно написаны, как сумма дробей, ибо вычисления (в особенности, если пользоваться таблицами обратных величин) удобнее производить в виде простых операций сложения обратных величин емкостей, чем вычислять $C_{вз}$ по известным формулам для последовательного соединения емкостей.

В результате этих упрощений получаем новую цепочку емкостей (фиг. 4-27). В этой схеме емкости на бак $C_{вб}$ двух зон отнесены к внешнему переходу, например A_1 из одной катушки в другую, а емкости $C_{вз}$ двух зон на сердечник отнесены к внутреннему переходу (например B) из одной катушки в другую. Поэтому эти емкости удвоены. Стенки бака и сердечник заземлены, и хотя нельзя ожидать, что

$C_{ВЗ}$ и $C_{ВБ}$ равны друг другу, но все же условно емкость на бак и на сердечник одной зоны относят к среднему витку катушки. Тогда эти параллельные емкости можно сложить

$$C_З = C_{ВЗ} + C_{ВБ} \tag{4-13}$$

и получить простую цепочку емкостей $C_З$ и K_1 (фиг. 4-28).

На значительной части обмотки значения $C_З$ и K_1 будут постоянны. Для этих частей мы получаем, таким образом, однородные цепочки, следовательно, при подсчете емкости такого участка можем применить формулы, аналогичные формуле (4-9), что значительно упростит вычисления. Но для целого ряда участков обмотки — входные витки, разгоны у отпаек для регулировки и т. п.—цепочка будет состоять из неоднородных емкостей. В этих случаях потребуются иные способы вычислений (см. несколько далее).

Обычно каждая из систем емкостей на сердечник $C_{ВН} C_{НЗ}$ или $C_{ВС}$, $C_{СН}$ $C_{НЗ}$ состоит из нескольких слоев разных диэлектриков с разными диэлектрическими постоянными—масло, бакелитовые цилиндры, электрокартон. Кроме того, вертикальные рейки (фиг. 4-2) занимают в среднем от 12 до 18% от длины окружности, считая посередине канала (средний диаметр d_1). Таким образом, конденсаторный слой между обмоткой и цилиндром, частично на длине β_1 состоит из твердого диэлектрика (электрокартона $\varepsilon_к = 5{,}5$) частично на длине $1 - \beta_1$ состоит из трансформаторного масла ($\varepsilon_м = 2{,}3$). Здесь β_1 выражается обычно в долях от длины окружности среднего диаметра d_1, т. е.

$$\beta_1 = \frac{nb}{\pi d_1}, \tag{4-14}$$

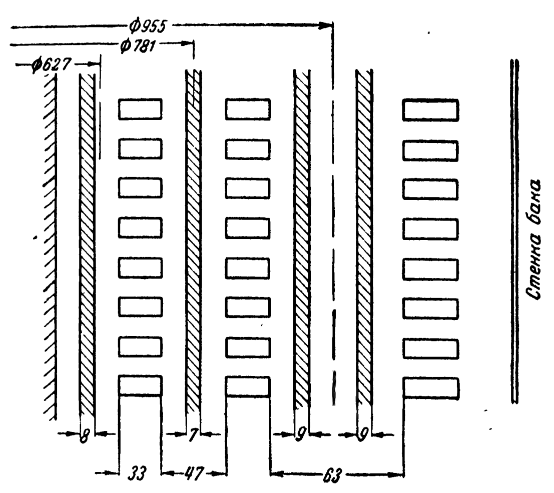
здесь n — число клиньев;
b — ширина клина в *мм*;
d_1 — средний диаметр в *мм*.

Для такого составного слоя в формулу емкости плоского конденсатора (4-8) надо, очевидно, подставить вместо ε среднее значение $\varepsilon_{ср}$

$$\varepsilon_{ср} = \beta_1 \varepsilon_к + (1 - \beta_1)\varepsilon_м. \tag{4-15}$$

Для всех остальных слоев расчет общей емкости удобнее всего производить путем сложения обратных величин емкостей отдельных слоев. Расчеты показывают, что не имеет смысла для каждого слоя диэлектрика вычислять свой средний диаметр, а можно, например, для всех слоев, образующих емкость между обмоткой ВН и НН, вести расчет по среднему диаметру канала между ВН и НН. Подобным же обра-

зом расчет остальных емкостей производится по среднему диаметру соответствующего канала. Толщина самих катушек НН и СН не входит в систему емкостей на сердечник, но толщина изоляции проводов этих катушек учитывается таким образом, что общая емкость на сердечник уменьшается на 5—8%.



Фиг. 4-29. Размеры обмоток для емкостного расчета.

Пример расчета (фиг. 4-29). Высота зоны $h=1{,}79$ *см*.

Для бумажно-бакелитовых цилиндров . . . . $\varepsilon_б=4{,}5$
Для электрокартонных клиньев . . . . $\varepsilon_к=5{,}5$
Для масла . . . . $\varepsilon_м=2{,}3$

Средний диаметр для $C_{BC}=95{,}5$ *см*. Если число реек $n=18$, ширина рейки 1,9 *см*, то [формула (4-14)]

$$\beta_1=\frac{18\cdot 1{,}9}{\pi\cdot 95{,}5}=0{,}114.$$

Найдем среднее значение $\varepsilon_{ср}$ формулы (4-15)

$$5{,}5\cdot 0{,}114=0{,}626$$
$$2{,}3\cdot 0{,}886=2{,}04$$
$$\varepsilon_{ср}=2{,}67$$

Тогда, производя расчет емкостей в *см*, т. е. отбрасывая множитель $9\cdot 10^{-11}$, получим, что

$$\frac{1}{C_{BC}}=\frac{4}{h}\sum\frac{l}{d\varepsilon}=\frac{4}{h}\,\frac{1}{95{,}5}\left[\frac{0{,}9+0{,}9}{4{,}5}+\frac{6{,}3-1{,}8}{2{,}67}\right]=\frac{4}{h}\cdot 0{,}0218.$$

Аналогично по (4-14) для C_{CH}

$$\beta_1 = \frac{18 \cdot 1,9}{\pi \cdot 78,1} = 0,139$$

и по (4-15)

$$5,5 \cdot 0,139 = 0,765$$
$$2,3 \cdot 0,861 = 1,98$$
$$\varepsilon_{cp} = 2,75$$

$$\frac{1}{C_{CH}} = \frac{4}{h} \sum \frac{l}{d\varepsilon} = \frac{4}{h} \frac{1}{78,1} \left[\frac{0,7}{4,5} + \frac{4,7 - 0,7}{2,75} \right] = \frac{4}{h} \cdot 0,0208.$$

Наконец, для емкости между обмоткой НН и сердечником имеем

$$\beta_1 = \frac{18 \cdot 19}{\pi \cdot 62,7} = 0,174;$$

$$5,5 \cdot 0,174 = 0,960$$
$$2,3 \cdot 0,826 = 1,90$$
$$\varepsilon_{cp} = 2,86$$

$$\frac{1}{C_{HЗ}} = \frac{4}{h} \sum \frac{l}{d\varepsilon} = \frac{4}{h} \left[\frac{0,8}{4,5} + \frac{2,5}{2,86} \right] = \frac{4}{h} \cdot 0,0168$$

и для всех трех емкостей

$$\frac{1}{C_{ВЗ}} = \frac{4}{h} (0,0218 + 0,0208 + 0,0168) = \frac{4}{h} \cdot 0,0594.$$

Тогда, учитывая при помощи коэффициента, 0,95 уменьшение емкости из-за изоляции проводов катушек НН и СН, получим

$$C_{ВЗ} = 0,95 \frac{h}{4 \cdot 0,0594} = \frac{0,95 \cdot 1,79}{4 \cdot 0,0594} = 7,15 \text{ см}.$$

Расчет емкости зоны между обмоткой и баком можно произвести аналогичным образом, введя еще несколько упрощающих допущений, так как встречаются конструкции, в которых ось остова трансформатора смещена относительно оси бака, и потому получаются различные расстояния a_1 и a_2 (фиг. 4-30) от обмотки до бака или (для размещения отводов и переключателей) центр закругления бака смещается относительно центра крайней фазы (фиг. 4-31 — левая часть). Наконец, бак может быть прямоугольной формы с небольшими закруглениями на краях (фиг. 4-31 — правая часть). Во всех этих случаях рекомендуется расчет вести, исходя из некоторой средней линии между обмоткой и стенкой бака. Расчет ведется по формуле для плоского конденсатора

$$C = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{L_{cp} h}{4\pi l_{cp}} \cdot \qquad (4\text{-}16)$$

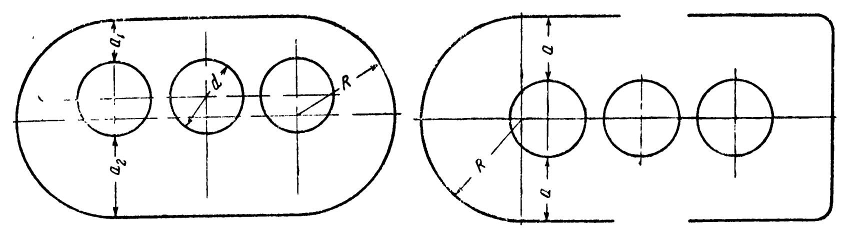
здесь $L_{ср}$ — среднее значение для одной из трех фаз длины средней линии между обмоткой и стенкой бака в *см*;

h — как и раньше, высота зоны в *см*;

$l_{ср}$ — среднее расстояние от обмотки до бака в *см*.

Вообще значения емкостей на бак получаются сравнительно небольшими, и потому все эти упрощающие допущения мало влияют на результат.

Ранее приведенные формулы (4-9) или (4-10) позволяют сократить вычисления для однородных цепочек. При подсчете емкостей C_1 (фиг. 4-26) следует так же, как при подсчете емкости на сердечник, учесть неоднородное строение отдель-



Фиг. 4-30. Формы баков. К расчету емкости на бак.

Фиг. 4-31. Формы баков. К расчету емкости на бак.

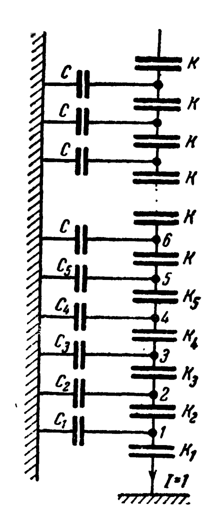
ных слоев конденсаторов. Так, в канале между катушками будут находиться прокладки, занимающие β-тую долю средней длины окружности [ср. формулу (4-14), но без индексов]. Для этого составного слоя вводится среднее значение диэлектрической постоянной, как в формуле (4-15). Так как между проводами соседних катушек будут слои разных диэлектриков: изоляция на проводе, усиленная изоляция катушек, масляный канал с прокладками, изоляционные шайбы, то подобно формулам (4-12) или (4-11) расчет емкостей C_1 (фиг. 4-26) удобнее всего производить, как и для емкостей на сердечник, суммируя обратные значения емкостей отдельных слоев.

При наличии емкостного кольца расчет внутренних емкостей катушки по формуле (4-9) дает более достоверные данные, чем при отсутствии емкостного кольца. Вообще же наличие емкостного кольца обуславливает более равномерное распределение напряжения в слоях обмоток при импульсных воздействиях. Обычно емкостные кольца, как детали, не нагружаемые рабочими токами, не делаются из сплошного металла, а представляет собой кольца из изоляционных материалов, но с металлизированной поверхностью. Эта металлизированная поверхность электрически соединяется с начальным витком обмотки. Емкостное кольцо не может быть, конечно, замкнутым кольцом, так как оно образовало бы коротко-

замкнутый виток. Поэтому емкостные кольца делаются с радиальным разрезом, шириной 20—40 *мм*.

Как указывалось выше, упрощенная емкостная цепочка, к которой необходимо привести все емкости, не может быть равномерной для трансформаторов на напряжения 35, 110 *кв* и выше. В тех случаях, когда нейтраль заземляется, все же часть концевых катушек делается с усиленной изоляцией.

Емкостный расчет делается для того, чтобы найти кривую первоначального распределения напряжения. После того, как вышеуказанным способом определены все емкости отдельных элементов цепочек, производится, начиная с нулевой точки, расчет напряжений и токов, предполагая, что ток в конденсаторе K_1 (фиг. 4-32) равен 1 и частота $\omega = 1$,



Фиг. 4-32. Схема цепочки емкостей для расчета первоначального распределения.

Тогда, очевидно, напряжение в точке *1* равно

$$\Delta U_1 = U_1 = \frac{I_1}{K_1}. \qquad (4\text{-}17)$$

Ток ΔI_1, ответвляющийся через емкость C_1, равен

$$\Delta I_1 = C_1 U_1 \qquad (4\text{-}18)$$

и, следовательно, ток I_2 через конденсатор K_2 будет равен

$$I_2 = I_1 + \Delta I_1. \qquad (4\text{-}19)$$

Поэтому падение напряжения ΔU_2 на конденсаторе K_2 найдется по формуле, аналогичной формуле (4-17):

$$\Delta U_2 = \frac{I_2}{K_2}.$$

Далее снова определяется ток ΔI_2, ответвляющийся через емкость C_2, по формуле, аналогичной формуле (4-18), потом находится суммарный ток I_3 [формула (4-19), но с заменой индексов]. Таким образом, для каждой из точек *1*, *2*, *3*, *4*,... повторяется ряд простых вычислений по формулам (4-17)—(4-19), на основании которых определяются все напряжения и токи в узлах *1*, *2*, *3*, *4*.

Для расчета колебательных процессов при срезе волны и при других подобных явлениях (см. фиг. 4-23) пользуются понятием приведенной емкости трансформатора, определяемой по формуле

$$C_{пр} = \frac{I_1}{U_1}. \qquad (4\text{-}20)$$

При обычных значениях $\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}} > 3$

$$C_{пр} \approx \alpha K = \sqrt{KC}, \qquad (4\text{-}21)$$

т. е. приведенная емкость равна входной емкости

$$C_{пр} = C_{T}. \qquad (4\text{-}22)$$

В обычных трансформаторах первоначальное распределение при импульсных воздействиях не совпадает с конечным ($\alpha = 0$ на фиг. 4-15 и 4-16). При этом, чем больше α, тем больше градиенты на входных катушках. Кроме этого крайне нежелательного явления, колебания, возникающие при переходе начального распределения в конечное, также приводят к повышенным градиентам и напряжениям в обмотке. Ранее уже говорилось о том, что специальные защитные аппараты на подстанциях понижают амплитуды волн перенапряжений. Усиленная изоляция, в особенности входных катушек, является средством самозащиты трансформатора от последствий перенапряжений. Наконец, можно стремиться к тому, чтобы устранить ту причину, которая порождает повышенные градиенты и напряжения в обмотках, т. е. так перераспределить емкость в обмотках трансформатора, чтобы первоначальное распределение напряжения весьма мало отличалось от конечного, и таким образом, не было бы переходного колебательного состояния в обмотке. Эта мысль положена в основу конструкций так называемых нерезонирующих трансформаторов.

Рассматривая обмотку, как цепочку емкостей (фиг. 4-32), или фиг. 4-27, легко видеть, как показывает система формул (4-17), (4-18) и (4-19), что причиной отклонений первоначального распределения напряжения от прямой линии ($\alpha = 0$) является ответвление тока через емкости C на землю и постепенное вследствие этого понижение тока через емкости K. Если бы ток через емкость K был постоянным, или всюду был равен нулю (для обмотки с изолированной нейтралью), то напряжение на емкостях K распределялось бы равномерно или было бы постоянным (для обмотки с изолированной нейтралью). Рассмотрим для упрощения лишь обмотку с глухозаземленной нейтралью и равномерно распределенными емкостями. Тогда полностью нерезонирующая обмотка должна была бы иметь прямолинейное распределение напряжения (фиг. 4-33). Присоединим к обычной цепочке емкостей C и K еще новую систему емкостей C_k, начало которой присоединено к началу обмотки A (фиг. 4-34). Значения емкостей C_k (фиг. 4-34) необходимо в каждой точке x

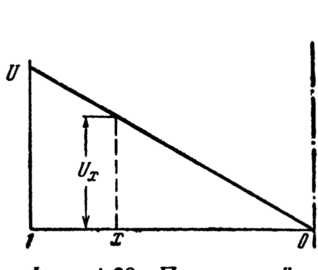
подобрать таким образом, чтобы ток i_x через емкость C_k был бы равен току i_C через емкость C, т. е. в точке x должно быть

$$CU_x = C_k(U - U_x), \tag{4-23}$$

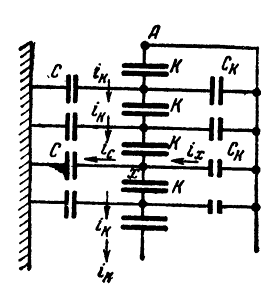
но $U_x = xU$ (фиг. 4-33) и, следовательно,

$$C_k = C\frac{x}{1-x}. \tag{4-24}$$

Этот общий ход рассуждений остается в силе и для обмоток с неравномерно распределенными емкостями или для



Фиг. 4-33. Прямолинейное распределение напряжения.



Фиг. 4-34. Схема компенсирующих емкостей нерезонирующего трансформатора.

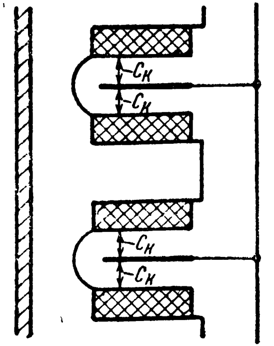
обмотки с изолированной нейтралью. Таким образом, требуется подобрать такую систему компенсирующих емкостей C_k, чтобы в каждой точке x ток компенсирующих емкостей был бы равен току, ответвляющемуся через емкость C.

Конструктивно система компенсирующих емкостей может быть выполнена весьма разнообразно. Так, инж. М. В. Липковский [Л. 26] выполнил систему компенсирующих емкостей в виде плоских кольцеобразных конденсаторов, помещенных в горизонтальных каналах между катушками (фиг. 4-35). В этом случае система компенсирующих емкостей C_k соединяется по схеме (фиг. 4-36), предложенной инж. А. В. Пановым. Тогда значения компенсирующих емкостей определяются по формуле

$$C_k = C\frac{x^2}{2}. \tag{4-25}$$

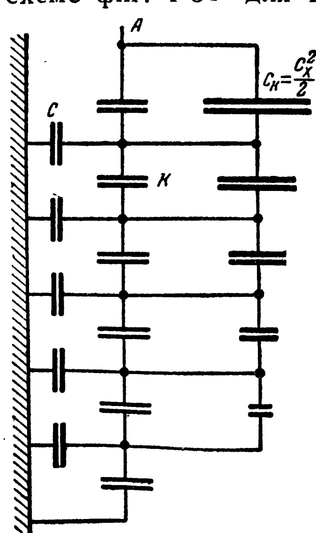
Емкостные щиты инж. К. К. Палуева представляют систему компенсирующих емкостей по схеме фиг. 4-34. Они более сложны для изготовления, так как щит, соединенный электрически с началом обмотки, должен по высоте находиться на разных расстояниях от катушек, и притом дуга охвата

для разных катушек должна быть разная. В итоге щит оказывается наклонно расположенным к обмотке и имеет вычурную форму.

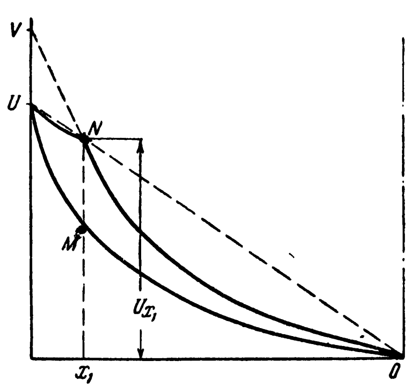


Фиг. 4-35. Схема встроенных емкостей для емкостной защиты.

Частичная компенсация токов на землю I_C по схеме фиг. 4-34 только у входных катушек уменьшает градиенты на этих катушках, и таким образом, облегчает условия нагрузки на изоляцию. При расчете такой частичной компенсации необходимо иметь в виду, что область, где можно ожидать повышенных градиентов, окажется теперь непосредственно за зоной компенсации. Если предположить, что обмотка с глухозаземленной нейтралью может быть представлена в виде цепочки равномерных емкостей, то без компенсации она имела бы первоначальное распределение в виде кривой UMO (фиг. 4-37). Допустим, что далее осуществлена частичная компенсация по схеме фиг. 4-34 для входных витков для зоны от 1 до x_1 (фиг. 4-37). Тогда первоначальное распределение может быть представлено некоторой ломаной кривой UNO. В точке N за зоной компенсации градиент, очевидно, возрастет.



Фиг. 4-36. Схема компенсирующих емкостей.



Фиг. 4-37. Кривые для расчета неполной защиты.

Новое первоначальное распределение от точки N можно было бы представить по формуле

$$U_x = \frac{\operatorname{sh} \alpha x}{\operatorname{sh} \alpha} V, \tag{4-26}$$

где новое значение V—ордината кривой при $x=1$ найдется из условия

$$V\frac{\operatorname{sh}\alpha x_1}{\operatorname{sh}\alpha}=U_{x_1}, \qquad (4\text{-}27)$$

здесь U_{x_1} — значение напряжения (при первоначальном его распределении) на конце зоны компенсации в точке x_1. Поэтому при расчете следует подбирать такое оптимальное перемещение точки M в некоторую точку N (фиг. 4-37) при частичной компенсации, так, чтобы были достаточно понижены градиенты на входном участке от 1 до x_1, и вместе с тем, чтобы в начале некомпенсированной зоны около x_1 не получилось слишком больших градиентов.

Теория и конструктивное выполнение частичной емкостной компенсации разработаны лауреатами Сталинской премии инж. С. И. Рабиновичем, Ю. С. Кронгаузом, А. Г. Перлиным, В. Б. Гельпериным и А. М. Чертиным и применяются Московским трансформаторным заводом для трансформаторов на 110 *кв* и выше.

ГЛАВА ПЯТАЯ

РАСЧЕТ ОБМОТОК

5-1. РАСЧЕТ АКТИВНЫХ ПОТЕРЬ В ОБМОТКАХ

В § 2-4 были указаны способы расчета активных потерь в остове трансформатора, практически равных так называемым, в стандарте ГОСТ-401-41, потерям холостого хода. В этом стандарте нормируются также потери, именуемые потерями короткого замыкания. Значительную долю этих потерь короткого замыкания составляют активные потери в обмотках. Остальные элементы потерь короткого замыкания приобретают существенное значение лишь для некоторых сочетаний напряжений или особых конструктивных выполнений.

Практически расчет отдельных элементов потерь короткого замыкания производится не последовательно друг за другом, а чередуясь с другими электромагнитными расчетами, так как для расчета некоторых элементов потерь короткого замыкания требуются данные других электромагнитных расчетов.

Активные потери в обмотках слагаются из двух частей: потерь, которые были бы при равномерном распределении плотности тока по сечению провода и потерь, которые появляются из-за вихревых токов в толще провода, в результате чего получается неравномерное распределение плотности тока по сечению провода. Первые потери ранее назывались потерями при постоянном токе, или омическими потерями, а вторые — добавочными потерями. Обычно потери при равномерном рас-

пределении токов составляют основную наибольшую долю активных потерь в обмотке и потому эти потери далее так и называются — основные активные потери в обмотке. Если добавочные потери становятся слишком большими, то это расценивается, как некоторый недостаток конструкции обмотки. Основные потери в обмотке $P_{м.о}$ подсчитываются после того, как сделано «размещение обмотки в окне», т. е. выбран тип обмотки (глава 3) и определены осевые и радиальные размеры катушек, внутренний и наружный диаметр обмотки, а также числа витков в катушках. Как указывалось ранее, перед размещением обмотки в окне выбираются основные изоляционные расстояния и изоляция проводов и катушек друг от друга.

Сечение проводов для трансформатора заданной мощности легко найти, если известна плотность тока. При всех теоретических расчетах плотность тока либо бывает заранее задана, либо находится, как результат расчета. В тех случаях, когда приходится пользоваться приближенными способами определения основных размеров трансформаторов, плотность тока заранее неизвестна. В этих случаях можно ориентироваться следующими указаниями. Для нормальных силовых трансформаторов с масляным охлаждением плотность тока постепенно растет с увеличением мощности, начиная от 2,5—2,8 *а/мм²* для 1—5 *ква*, 3—3,3 *а/мм²* для 100 *ква*, 3,8—4,2 *а/мм²* для 1 000—1 800 *ква*. Далее плотность тока лишь незначительно повышается до 4,6 *а/мм²* для 10 000 *ква*, а в некоторых случаях даже несколько понижается — до 3,5—3 *а/мм²*. Условия перевозки мощных трансформаторов, а также высокие рабочие напряжения существенно влияют на основные размеры трансформаторов, нарушая более или менее единообразную геометрию трансформаторов, которая была характерна для трансформаторов средней мощности.

Для трансформаторов с принудительной циркуляцией масла и внешним водяным или воздушным охлаждением масла плотности тока берутся порядка 5—5,5 *а/мм²*.

Для сухих трансформаторов, т. е. с естественным воздушным охлаждением, плотности тока берутся порядка 1,5—2,2 *а/мм²* для внутренних обмоток и порядка 2,5—3,2 *а/мм²* для наружных катушек.

Провода прямоугольного сечения могут иметь разные размеры при одной и той же площади сечения. Эти размеры нужно так выбирать, чтобы получились приемлемые условия охлаждения обмоток. Можно руководствоваться следующими указаниями. Для цилиндрических двухслойных катушек масляных трансформаторов на температуру катушек при заданной плотности тока и заданной высоте обмотки влияет радиальный размер провода. Он берется обычно около 4 *мм*. Для дисковых катушек, т. е. непрерывных спиральных и тому

подобных катушек, на нагрев обмоток влияет осевой размер провода, который обычно берется не более 7—8 *мм*. В некоторых случаях приходится отступать от этих размеров. Так, например, для входных катушек мощных высоковольтных трансформаторов часто применяются провода с осевым размером 10—12,5 *мм*. В этом случае увеличивается емкость между витками, что способствует понижению градиентов при первоначальном распределении напряжений импульсных воздействий. Но одновременно с этим из-за усиленной изоляции входных катушек приходится понижать плотность тока до 1,5—2,5 *а/мм²*. Так как во входных катушках всего лишь несколько процентов от общего числа витков, то эта особенность входных катушек не меняет существа предыдущих указаний.

Очевидно, что, пользуясь предыдущими указаниями, не всегда сразу получится расчет, приемлемый, как с точки зрения общих потерь в медных проводах, так и с точки зрения температур в обмотках. Поэтому чаще всего раскладку витков в окне приходится несколько раз изменять, быстро пересчитывая основные потери и нагрев катушек.

Расчет основных потерь $P_{м.о}$ в обмотке можно было рассчитывать по известной формуле омических потерь

$$P_{м.о}=I^2R, \qquad (5\text{-}1)$$

где R — активное сопротивление в *ом*. Однако, на практике чаще всего пользуются другой формулой, в которой потери выражаются через плотность тока и вес медных проводов. При этом учитывается установленная стандартом ГОСТ 401-41 условная температура медного провода 75° С, т. е. считается, что удельное сопротивление материала проводов определяется по формуле

$$\rho_{75}=\rho_{20}[1+\alpha(t-20)]=\rho_{20}[1+55\alpha]. \qquad (5\text{-}2)$$

Для меди при температуре 20°С

$$\rho_{20}=0{,}0175\,\frac{ом\cdot мм^2}{м}.$$

Для алюминия

$$\rho_{20}=0{,}03\,\frac{ом\cdot мм^2}{м}.$$

Для меди и алюминия температурный коэффициент α равен приблизительно 0,004 и поэтому формула (5-2) примет вид

$$\rho_{75}=1{,}22\rho_{20}. \qquad (5\text{-}3)$$

Преобразование формулы (5-1) для получения указанной выше зависимости от плотности тока и веса производится

следующим образом. Если l — общая длина провода в *м*, а q — сечение в *мм²*, то очевидно

$$P_{м.о}=1{,}22I^2\rho_{20}\frac{l}{q}.$$

Умножая правую часть на единицу в виде $\frac{q}{q}\cdot\frac{\gamma}{\gamma}$, где γ — удельный вес, получим, применяя знак $\equiv$ для обозначения пропорциональности

$$P_{м.о}=1{,}22I^2\rho_{20}\frac{l}{q}\cdot\frac{q}{q}\cdot\frac{\gamma}{\gamma}\equiv1{,}22\delta^2\frac{\rho_{20}}{\gamma}lq\gamma\equiv1{,}22\frac{\rho_{20}}{\gamma}\delta^2G_м, \quad (5\text{-}4)$$

здесь δ — плотность тока, а $G_м$ — вес медных проводов. Если плотность тока выразить в *а/мм²*, а вес в *кг*, то после всех преобразований формула (5-4) примет вид

$$P_{м.о}=2{,}4\delta^2G_м. \quad (5\text{-}5)$$

Эта формула применяется порознь для обмоток первичного и вторичного напряжения. Очевидно, если в какой-либо обмотке есть несколько частей с катушками, имеющими разные плотности тока, то формула (5-5) должна применяться порознь для каждой части обмотки.

Активные потери (в *вт*), отнесенные к мощности трансформатора (в *ква*), дают относительное активное падение напряжения u_a. Тогда, очевидно, u_a в процентах равно

$$u_a=\frac{P_м}{P\cdot1\,000}\cdot100=\frac{P_м}{10P}. \quad (5\text{-}5а)$$

Для определния общего расхода металла подсчет веса проводов производится для всех витков обмотки. Однако, в обмотках, имеющих витки для регулировки напряжения, часть витков может быть обесточенной. Согласно ГОСТ-401-41 все расчеты потерь производятся для номинальной средней ступени напряжения. Поэтому для обмоток, которые имеют витки для регулирования напряжения в пределах $\pm5\%$ общий вес медных проводов подсчитывается для всех витков, т. е. для ступени $+5\%$. Для средней же ступени число включенных витков будет на 5% меньше и потому в формулу (5-5) подставляется 0,95 от полного веса медных проводов.

Точный подсчет добавочных потерь чаще всего производится после расчета напряжения рассеяния. В некоторых случаях значение добавочных потерь можно подсчитать, если произведен расчет основного и поперечного поля рассеяния. Если же требуется приближенно оценить процент средних добавочных потерь, то, пользуясь кривыми приложения IX (листы 3 и 4), можно считать, что β приблизительно равен разме-

ру провода перпендикулярно потоку рассеяния. Далее можно еще указать, что для круглых проводов диаметром менее 3 *мм* добавочные потери ничтожно малы. Если в катушке увеличивается размер провода перпендикулярно потоку рассеяния, то процент добавочных потерь возрастает приблизительно пропорционально четвертой степени увеличения размера провода перпедикулярно потоку рассеяния. Если известна индукция потока рассеяния, то можно считать, что добавочные потери (в *вт*) изменяются пропорционально квадрату индукции потока рассеяния. Более подробные указания о расчете добавочных потерь — см. § 5-3.

5-2. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЯ РАССЕЯНИЯ

Приведенная в приложении VIII на листе 1 формула (1) является общеизвестной формулой для подсчета напряжения рассеяния [Л. 1, 2, 3, 5, 7, 8]. Эта формула преобразована таким образом, чтобы она была более удобна для вычислений и чтобы результаты получались не в вольтах, а в процентах. При пользовании логарифмической линейкой наиболее удобными для расчета являются, как правило, формулы в виде дроби, где число множителей в числителе равно или на единицу больше, чем в знаменателе.

Как известно, намагничивающая сила первичной обмотки равна намагничивающей силе вторичной (знак этой намагничивающей силы в данном случае значения не имеет). Поэтому в формулу (1) приложения VIII (лист 1) безразлично, какую н. с. *In* подставлять — н. с. первичной или вторичной обмотки.

Расчет напряжения в процентах позволяет легче сопоставлять технические характеристики трансформаторов на различные классы напряжения. Расчет напряжения рассеяния в вольтах или индуктивного сопротивления в омах производится весьма редко. Пересчет процентов на абсолютные единицы (вольты или омы) особых трудностей не представляет. Так, для однофазного трансформатора получим, что

$$U_p = U \frac{u_p}{100}, \qquad (5\text{-}6)$$

$$X_p = \frac{U_p}{I}, \qquad (5\text{-}7)$$

здесь u_p — напряжение рассеяния в %;
U — номинальное напряжение в *в*;
U_p — напряжение рассеяния в *в*;
I — номинальный ток в *а*;
X_p — индуктивное сопротивление в *ом*.

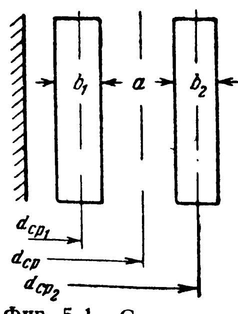
Для трехфазных трансформаторов необходимо при расчетах в абсолютных единицах еще учитывать схему соединения обмоток.

Наоборот, при расчете в относительных единицах (в процентах) безразлично, какую схему соединения — звезда или треугольник — имеют первичная или вторичная обмотка. Зато следует помнить, что при изменении номинальной мощности одного и того же трансформатора напряжение рассеяния, выраженное в процентах, изменится пропорционально изменению мощности. В трехобмоточных трансформаторах, у которых разные обмотки имеют разные мощности, напряжение рассеяния обычно относят к мощности наиболее мощной обмотки.

В тех случаях, когда обмотки имеют относительно большие радиальные размеры, рекомендуется вместо произведения $d_{ср}c$ в формуле (1) приложения VIII (лист I) брать сумму произведений среднего диаметра каждого элемента на приведенную ширину этого элемента, т. е. считать, что результирующее произведение $(d_{ср}c)_{рез}$ равно (см. фиг. 5-1)

$$(d_{ср}c)_{рез} = \frac{1}{3} b_1 d_{ср_1} + a d_{ср} + \frac{1}{3} b_2 d_{ср_2}. \qquad (5\text{-}8)$$

Для трансформаторов малой мощности толщина изоляции проводов составляет ощутимую долю (например, 5—10%) от толщины изолирующего канала или прокладок между первичной и вторичной обмотками. Поэтому рекомендуется всюду в формуле (1) приложения VIII (лист 1) размеры a, b_1, b_2 брать равными действительным геометрическим размерам каналов и катушек, но с учетом толщины изоляции проводов. Так, действительные („строительные") размеры катушек b_1 и b_2 — уменьшаются на толщину изоляции провода на обе стороны, а размер a канала увеличивается на ту же толщину. Расчет ведется, как говорится „от меди до меди". Эти же указания в равной мере относятся и к радиальным размерам катушек, показанных на всех фигурах приложения VIII (листы 1 и 2).



Фиг. 5-1. Схема для расчета приведенной ширины канала рассеяния обмоток концентрического типа.

Маленькие трапеции около каждого рисунка приложения VIII (лист 1) показывают приближенно характер изменения индукции B_p потока рассеяния в средней по высоте плоскости симметрии обмотки. Обычно предполагается, что это распределение индукции более или менее сохраняется по всей высоте $H_к$ обмотки. Значение наибольшей индукции B_p

потока рассеяния может быть найдено по формуле (5-9), если считать, что можно пренебречь напряженностями магнитного поля во всей области вне катушек и канала a

$$B_p = 1{,}78 \frac{In}{H_к} \rho_p, \qquad (5\text{-}9)$$

где In — полная намагничивающая сила одной обмотки;

$H_к$ — осевой размер катушки в *см*;

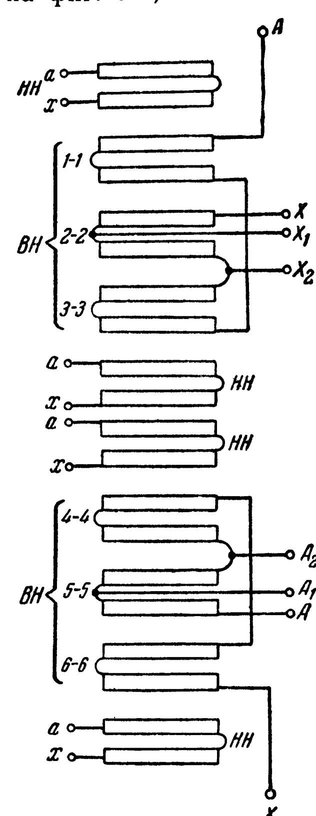
ρ_p — коэффициент Роговского см. формулу (5) приложения VIII (лист 2) и таблицу на том же листе.

Коэффициент ρ_p в формуле (5-9) и, следовательно, в формуле (1) приложения VIII (лист 1) вносит некоторую поправку в предыдущее предположение о равномерном распределении индукции потока рассеяния по всей высоте обмотки. В действительности на краях катушек магнитные сопротивления будут искривляться. Это искривление и учитывается коэффициентом ρ_p.

В основном формулы и фиг. ПVIII-1, ПVIII-2 и ПV-III-3 в приложении VIII относятся к концентрическим обмоткам. Если же эти рисунки повернуть на 90°, то они будут давать пояснение к применению формул расчета напряжения рассеяния для чередующихся дисковых обмоток. Однако следует иметь в виду, что для чередующихся дисковых обмоток применяется более сложное расположение катушек, чем то, которое получилось бы при этом повороте рисунков на 90°. Обычно для того, чтобы получить не слишком высокое значение напряжения рассеяния , делается несколько одинаковых групп чередующихся дисковых катушек. Но расчет напряжения производится только для одной лишь группы, ибо, если они все одинаковы, то процент падения напряжения будет один и тот же как для одной группы, так и для всей обмотки. Поэтому этот условный поворот рисунков следует понимать, как относящийся к одной из нескольких групп чередующихся дисковых обмоток.

Способы чередования катушек первичного и вторичного напряжений в чередующихся дисковых обмотках довольно разнообразны, в особенности, если одна из обмоток имеет регулировочные витки. При всех этих чередованиях следует всегда стремиться к симметричному расположению обмоток как друг относительно друга, так и относительно вертикальной оси и относительно средней по высоте горизонтальной плоскости. Так, например, всегда следует размещать последними около верхнего и нижнего ярма катушки одной и той же обмотки или ВН, или НН [фиг. VIII-4 приложения VIII (лист 2)]. Почти всегда оказывается более целесообразным последними размещать катушки НН, как показано на фиг. 4

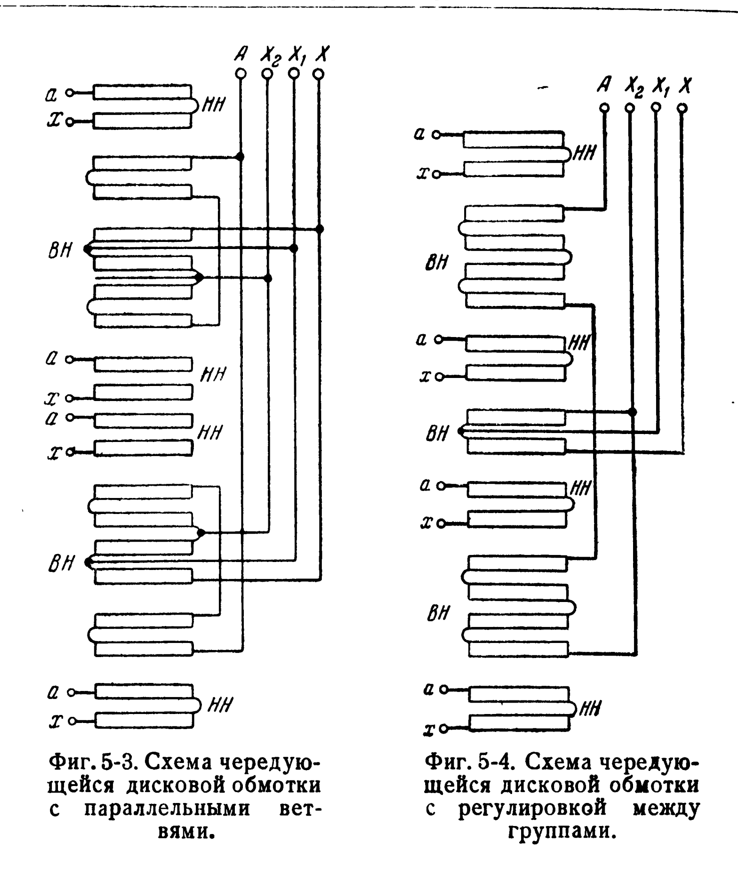
приложения VIII (лист 2), ибо в этом случае можно взять меньшее изоляционное расстояние от обмотки до ярма. Некоторые типы чередующихся дисковых обмоток показаны на фиг. 5-2, 5-3 и 5-4. Здесь предполагается, что все катушки низшего напряжения (НН) соединяются параллельно, т. е. соединяются вместе все концы, обозначенные буквой a, а также соединяются между собой все x. При исполнении этих обмоток следует обращать внимание на правильное соединение концов обмоток и направление их намотки. Так, для схемы, показанной на фиг. 5-2, катушки *1-1* и *6-6* должны иметь одинаковое направление намотки, например левое. Тогда катушки *2-2*, *3-3*, *4-4* и *5-5* должны иметь правое направление обмотки. То же самое указание относится к схеме на фиг. 5-3. Катушки же высшего напряжения ВН в схеме по фиг. 5-4 должны иметь одно и то же направление намотки. Концы, обозначенные буквами A_1, A_2, A_3 и X_1, X_2, X_3, служат для регулирования напряжения. Во всех этих схемах симметричное расположение катушек НН по отношению к находящимся под током катушкам ВН получается для крайних ступеней регулировки напряжения.



Фиг. 5-2. Схема чередующейся дисковой обмотки с регулировкой.

Показанные на фиг. 5-2, 5-3 и 5-4 схемы применяются для специальных типов трансформаторов, где требуются более широкие пределы регулировки напряжения, чем для нормальных силовых трансформаторов. Для того, чтобы сохранить одинаковыми радиальные размеры у всех катушек высшего напряжения, часто приходится для регулировочных катушек применять провода прямоугольного сечения другого профиля, чем для главных катушек. Для силовых трансформаторов, для которых требуются небольшие пределы регулирования $\pm 5\%$, допускается отступление от этих схем, и отпайки для регулировки делаются от промежуточных витков катушек.

На искривление магнитных силовых линий у краев катушек для чередующихся дисковых обмоток сильно сказывается бли-



Фиг. 5-3. Схема чередующейся дисковой обмотки с параллельными ветвями.

Фиг. 5-4. Схема чередующейся дисковой обмотки с регулировкой между группами.

зость остова трансформатора. Поэтому для чередующихся дисковых обмоток коэффициент ρ_p подсчитывается по более сложной формуле

$$\rho_p = 1 - \frac{1 - e^{-\frac{\pi H_к}{\lambda}}}{\frac{\pi H_к}{\lambda}} \left[1 - \frac{e^{-\frac{2\pi m}{\lambda}}}{2}\left(1 - e^{-\frac{\pi H_к}{\lambda}}\right)\right], \qquad (5\text{-}10)$$

здесь m — расстояние от обмоток до сердечника;

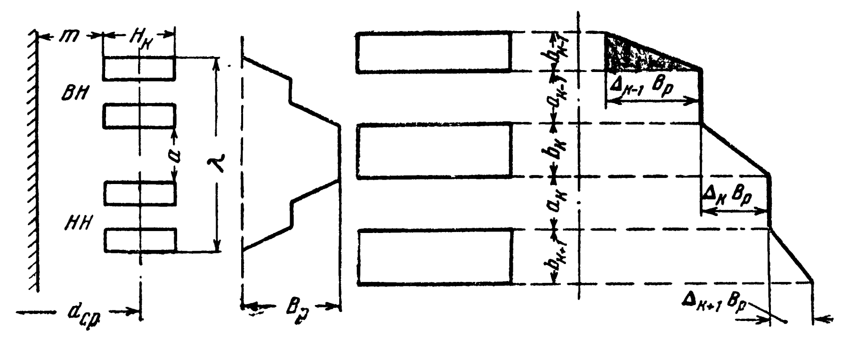
λ — ширина одной полугруппы потока рассеяния, т. е. от одной до другой точки перехода через нуль трапеции индукции B_p потока рассеяния (см. фиг 5-5).

Если в чередующихся дисковых обмотках получается равномерное распределение витков в катушках и осевые размеры катушек одинаковы, но число катушек в группе

более четырех, то расчет для c ведется по обобщенной формуле

$$c = \frac{1}{3}\sum_{1}^{n} b_k + \sum_{1}^{n}\left(\frac{In_k}{In}\right)^2 a_k, \tag{5-11}$$

где b_k и a_k — размеры k-той катушки и канала, считая от точки перехода через нуль трапеции индукции B_p потока рассеяния, In_k обозначает намагничивающую силу, действующую в k-том канале, т. е. н. с. считая от точки перехода через нуль трапеции индукции B_p потока рассеяния.



Фиг. 5-5. Трапеция индукции рассеяния чередующейся дисковой обмотки.

Фиг. 5-6. Несимметричная трапеция индукции рассеяния чередующейся обмотки.

В том случае, если витки распределены по катушкам неравномерно или размеры b_k неодинаковы (фиг. 5-6), то расчет c ведется по формуле

$$c = \sum_{k=1}^{k=n}\left[\left(\frac{In_k}{In}\right)^2 + \left(\frac{In_{k-1}}{In}\right)^2 + \frac{In_k\, In_{k-1}}{(In)^2}\right]\frac{b_k}{3} + \sum_{k=1}^{k=n}\left(\frac{In_k}{In}\right)^2 a_k. \tag{5-12}$$

In_k обозначает намагничивающую силу, действующую в k-том канале, т. е. число проводов с током, считая от точки перехода через нуль трапеции индукции B_p потока рассеяния.

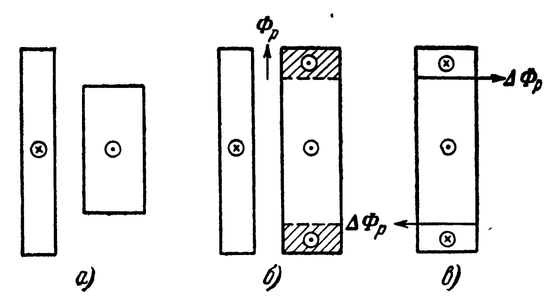
Эта формула применяется вообще в тех случаях, когда трапеция индукции B_p потока рассеяния имеет неодинаковые ступеньки, т. е. (фиг. 5-6).

$$\Delta_{k-1}B_p \neq \Delta_k B_p \neq \Delta_{k+1}B_p.$$

При проектировании концентрических обмоток необходимо также стремиться к симметричному расположению катушек ВН по отношению к катушкам НН и по отношению к сер-

дечнику, так как всякая несимметрия в расположении обмоток приведет к увеличению напряжения рассеяния, добавочных потерь и механических усилий.

В приложении VIII (листы 2—5) даны формулы для подсчета добавочного напряжения рассеяния в тех случаях, когда имеют место сравнительно небольшие несимметрии в расположении обмоток. Эти формулы получены путем разложения действительного потока рассеяния на два симметричных по отношению к остову потока. Чаще всего это разложение делается таким образом, что одно поле получается при концентрическом и симметричном распределении витков с



Фиг. 5-7. Схема разложения потока рассеяния несимметричных обмоток на продольный и поперечный потоки.

током, под действием которого получается поток рассеяния Φ_p, направленный вдоль канала рассеяния (вдоль стержня— продольный поток). Другое поле получается под действием витков, образующих как бы систему чередующихся дисковых обмоток, т. е. поток рассеяния $\Delta\Phi_p$, под действием этих витков поток направлен радиально (поперечное поле). Основная идея этого разложения показана на фиг. 5-7. Для получения продольного поля укороченную обмотку (фиг. 5-7,*а*) можно достроить так (заштрихованные части на фиг. 5-7,*б*), чтобы эта достроенная обмотка была бы симметрично расположена по отношению к другой обмотке. При этом построении общее число витков с током в основной части укороченной обмотки должно быть уменьшено для того, чтобы восполнить число витков с током, прибавленных в достроенной части обмотки.

Число и разложение витков с током, вызывающих поперечное поле (фиг. 5-7,*в*), выбираются таким образом, чтобы сумма чисел и суммарное расположение витков с током, вызывающих продольное поле (по фиг. 5-7,*б*), давали бы действительное число и расположение витков с током в укороченной обмотке (фиг. 5-7,*а*).

Неравномерности в расположении и распределении витков с током появляются вследствие следующих причин:

а) различные изоляционные расстояния от ярма обмоток высшего и низшего напряжений;

б) наличие отключенных регулировочных витков;

в) наличие в обмотке высшего напряжения входных катушек с усиленной изоляцией проводов.

Вообще можно сказать, что добавочное напряжение рассеяния будет вызывать такое распределение и расположение витков с током в обмотках, при котором не обращается в нуль сумма линейных плотностей тока обеих обмоток в любой произвольно выделенной зоне по высоте обмотки. Практически всегда стремятся свести эту разницу линейных плотностей тока к как можно меньшему значению.

В тех случаях, когда требуется большая точность расчета обмоток, имеющих довольно сложную форму распределения ампервитков, приходится применять другие методы расчета, детально разработанные Г. Н. Петровым [Л. 33, 36], В. А. Карасевым [Л. 35] и Э. А. Манькиным [Л 34]. Способы решения задачи нахождения напряжения рассеяния несимметричного поля, предложенные каждым из этих авторов, различны, но математически достаточно строги. Проф. Г. Н. Петров широко использует разработанную им теорию многообмоточных трансформаторов. Метод инж. Э. А. Манькина, основанный на определении пограничных условий в плоскости раздела зон с различными несимметриями в распределении витков с током, достаточно хорошо оправдал себя на практике в ряде специальных случаев расчета напряжения добавочного рассеяния.

Для расчета напряжения рассеяния для трехобмоточных трансформаторов в приложении VIII (лист 5) приведены формулы, выведенные проф. Г. Н. Петровым [Л. 2], и П. П. Чусовым [Л. 32], в разработанной им теории многообмоточных трансформаторов.

Формулы же для подсчета напряжения короткого замыкания [приложение VIII (лист 6) формулы (13) и (14)] и падения напряжения [приложение VIII (лист 6) формула (15)] хорошо известны из теоретических курсов электротехники. При расчете трансформаторов по этим формулам производятся лишь расчеты основных технических параметров трансформаторов. Обычно различные случаи нагрузки и падения напряжения, в особенности для многообмоточных трансформаторов, подсчитываются проектными организациями при выборе типа трансформатора.

5-3. РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ В ОБМОТКАХ

Для расчета добавочных потерь, возникающих в обмотках трансформаторов под действием потока Φ_p, применяются те

же формулы [см. приложение IX (лист 3) формулы (4) и (5)], что и для электрических машин, т. е. для случая расположения проводов в пазу (фиг. 5-8). Многочисленные расчеты и испытания показали, что эти формулы могут применяться и для случая расположения проводов в окне трансформатора. В этом случае расчетные значения добавочных потерь достаточно хорошо совпадают с результатами измерений потерь в обмотках. Это хорошее совпадение результатов расчета и измерений имеет место, по крайней мере, в области сравнительно малых значений добавочных потерь. Сходство расположения проводов в окне трансформатора с расположением проводов в пазу принципиально более или менее очевидно (фиг. 5-9). В сечении же, перпендикулярном продольной плоскости трансформатора, вместо верхнего и нижнего ярма горизонтальными стальными плоскостями служат полки стальных балок, прессующих ярмо и служащих одновременно опорой для обмоток (фиг. 5-10).

Фиг. 5-8. Схема потока рассеяния в пазу машины

Фиг. 5-9. Схема потока рассеяния в окне трансформатора.

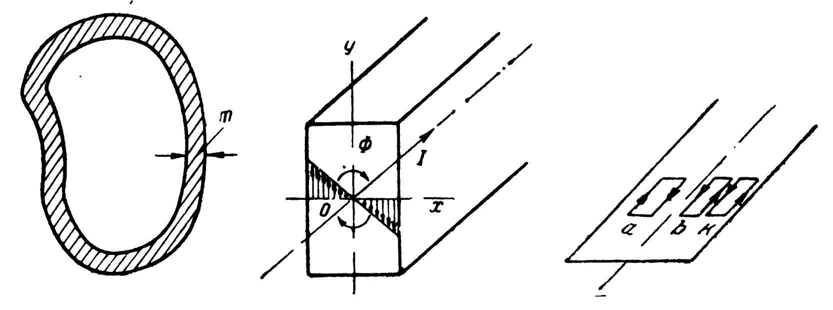
Фиг. 5-10. Схема потока рассеяния на лобовых частях трансформатора.

Очевидно, следует стремиться к уменьшению добавочных потерь. Большое значение добавочных потерь (10 и более процентов) обычно расценивается, как некоторый недостаток расчета.

Величина m [см. приложение IX (лист 1), формула (3)] иногда называется «глубиной проникновения». Это наименование выбрано по следующим соображениям. Если одиночный провод, т. е. такой провод, вблизи которого нет других проводов под током, имеет размеры, значительно превышающие размер m, то можно считать, что под действием магнитного поля вихревых токов ток нагрузки будет оттеснен к краям

провода. Тогда потери в проводе численно будут равны потерям, которые получаются, если предположить, что весь ток нагрузки равномерно распределен лишь на толщине m (фиг. 5-11).

Распределение тока в одиночном проводе больших размеров можно наглядно показать на следующем примере. Под действием потока Ф (фиг. 5-12), возникшего под влиянием тока I данного провода, в толще самого провода возникнут вихревые токи. Мысленно выделим на горизонтальной плоскости симметрии проводника элементарные контуры a, b, k (фиг. 5-13). В контурах a и b под действием потока Ф вихревые токи будут иметь различные вращения, а в кон-



Фиг. 5-11. Глубина проникновения.

Фиг. 5-12. Схема магнитного потока в одиночном проводе.

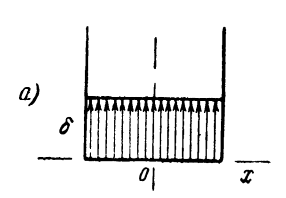
Фиг. 5-13. Вихревые токи в сечении провода.

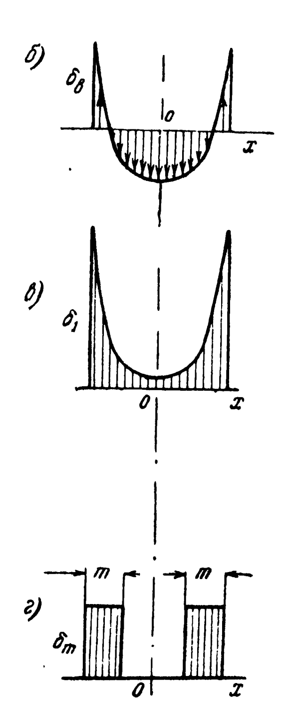
турах b и k—одинаковое вращение. Поэтому, если контуры b и k будут иметь общую сторону, то в ней пошел бы разностный ток двух соседних контуров. Токи этих контуров должны бы быть различными, так как значение потока Ф вырастает от середины провода к его краю.

Если для этих элементарных токов составить и решить дифференциальные уравнения, то получилось бы распределение плотности вихревых токов $\delta_в$, показанное на фиг. 5-14,*б*.

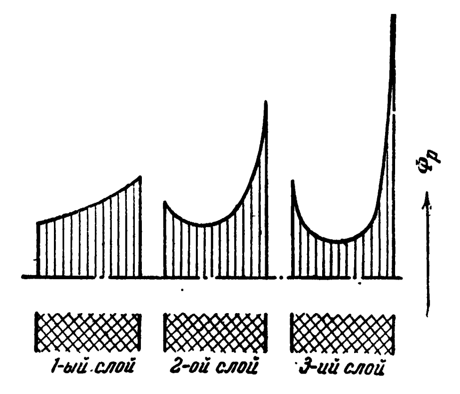
Эти плотности токов следует сложить с плотностью тока первоначально предполагаемого равномерно распределенного тока нагрузки (фиг. 5-14,*а*). При этом сложении следует иметь в виду, что плотности тока $\delta_в$ будут не только отличаться друг от друга по значению, но будут иметь еще разные сдвиги фаз. В результате этого сложения получается распределение суммарной плотности тока δ_1, показанное на фиг. 5-14,*в*. При большой толщине провода можно считать, что потери в проводе будут такими, как если бы весь ток был сосредоточен на краях провода (фиг. 5-14,*г*). Внутри провода значения плотности тока тогда ничтожно малы.

Из-за того, что в трансформаторах имеются две обмотки токи которых направлены в разные стороны и магнитное поле одной обмотки действует на магнитное поле другой обмотки, предыдущая картина распределения токов несколько изменяется. Общий характер распределения результирующих плотностей тока в трехслойной катушке показан на фиг. 5-15. Главный канал, в котором, как известно, поток рассеяния Φ_p достигает наибольшего значения, на этом рисунке показан справа. Этот рисунок показывает, что чем ближе располагается данный слой к главному каналу рассеяния, т. е. чем больше значение индукции B_p потока рассеяния, пронизывающего данный слой, тем сильнее неравномерность в распределении результирующей плотности потока по ширине провода. В последнем слое





Фиг. 5-14. Схема распределения вихревых токов в одиночном проводе



Фиг. 5-15. Схема распределения тока в трехслойной катушке.

(на фиг. 5-15—в третьем слое) почти весь ток отбрасывается к стороне, прилежащей к каналу рассеяния. В этом слое будут наибольшие добавочные потери, которые подсчитываются по формулам (5) или (7) приложения IX (лист 3) или по кривым фиг. ПIX-5 приложения IX (лист 5).

Обычно рассчитываются средние добавочные потери в нескольких слоях, так как при испытаниях трансформаторов можно измерить лишь среднее для всех слоев значение потерь.

Эти средние значения находятся или по кривым фиг. ПIX-4 приложения IX (лист 4), или по формулам (4) или (6) приложения IX (лист 3).

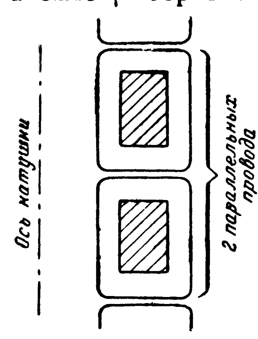
При выборе размеров медных проводов и числа слоев в обмотках концентрического типа следует обращать внимание на радиальный размер провода, ибо процент добавочных потерь увеличивается пропорционально четвертой степени увеличения радиального размера. Так как для медных проводов глубина проникновения m равна около 10 *мм* при 75° С, то при радиальном размере более 10 *мм* можно ожидать значительного повышения процента добавочных потерь.. Поэтому в однослойных цилиндрических катушках радиальный размер провода не берут более 10 *мм*. Вообще же, как это указывалось ранее, стараются не применять однослойных цилиндрических катушек, ввиду их малой механической прочности, в особенности в тех случаях, если провод не намотан на жестком изоляционном цилиндре, придающем виткам катушки бо́льшую устойчивость.

Для двухслойных цилиндрических катушек радиальный размер провода берется не более 5—5,5 *мм*. Вообще для предварительных оценок приемлемости тех или иных радиальных размеров проводов с точки зрения добавочных потерь можно приближенно считать, что относительная величина β, входящая в формулы приложения IX, несколько меньше радиального размера b провода. Если же в катушке имеется большое число слоев, например, в непрерывной катушке число слоев может быть порядка полутора, двух десятков, то возникает опасение, что добавочные потери в крайнем слое могут оказаться чересчур большими, хотя и средний процент добавочных потерь будет иметь вполне приемлемое значение. Как показывают элементарные упрощения формул (6) и (7) приложения IX (лист 3), максимальные добавочные потери несколько меньше, чем в три раза, превышают средние добавочные потери при большом числе слоев.

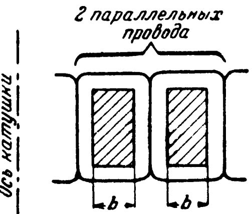
Для чередующихся дисковых обмоток добавочные потери зависят от осевых размеров проводов. Однако, в чередующихся дисковых катушках значение коэффициента ρ_p, входящего в формулу (2) приложения IX (лист 1), обычно бывает значительно меньше, чем в концентрических обмотках. Поэтому в дисковых обмотках можно брать несколько бо́льшие значения осевых размеров проводов, чем радиальные размеры в концентрических обмотках при одном и том же числе слоев.

Кривые фиг. ПIX-4 и ПIX-5 приложения IX (листы 4 и 5) вычислены для температуры проводов 75°С. Если задана другая температура проводов, то легко видеть [см. формулы (2) и (3) приложения IX (лист 1)], что при понижении температуры добавочные потери возрастут. Можно считать, что процент

добавочных потерь пропорционален четвертой степени от β, а само β обратно пропорционально корню квадратному из ρ — удельного сопротивления. Поэтому процент добавочных потерь с понижением температуры возрастет — изменится обратно пропорционально квадрату отношения удельных сопротивлений. Но этот процент добавочных потерь надо отнести к остальным потерям при пониженной температуре, которые, очевидно, уменьшатся пропорционально первой степени отношения удельных сопротивлений. В результате получим, что добавочные потери, выраженные в ваттах, при понижении температуры возрастут пропорционально первой степени отношения удельных сопротивлений, т. е. добавочные потери $(\Delta_t P)_{доб}$ в ваттах при $t°$ С равны



Фиг. 5-16. Расположение параллельных проводов в цилиндрической катушке.



Фиг. 5-17. Расположение параллельных проводов в дисковой катушке.

$$(\Delta_t P)_{доб} = \frac{1 + \alpha \cdot 55}{1 + \alpha(t - 20)} (\Delta_{75} P)_{доб}, \qquad (5\text{-}13)$$

где $(\Delta_{75} P)_{доб}$ — добавочные потери в *вт* при 75°С;

α — температурный коэффициент, равный для меди 0,00394.

При применении нескольких проводов, соединенных в параллель, следует обращать особое внимание на расчет добавочных потерь и на способы понижения этих потерь. Общие указания для расчета добавочных потерь в непрерывных обмотках и в спиральных обмотках при транспозиции даны в приложении IX на листе 2. Если для цилиндрических катушек приходится применять параллельные провода, то их располагают в вертикальном направлении друг над другом (фиг. 5-16) и избегают располагать параллельные провода в радиальном направлении (фиг. 5-17). В последнем случае, что процент добавочных потерь будет таким, как если бы провод имел размер, равный сумме радиальных всех параллельных проводов, т. е. для случая, показанного на фиг. 5-17, — этот радиальный размер равен $2b$. В действительности следовало бы производить более сложные расчеты, но и эти приближенные расчеты показывают, что добавочные потери будут слишком велики. Поэтому такое расположение параллельных проводов, как показано на фиг. 5-17, никогда не применяется.

Ниже в качестве примера приводится расчет добавочных потерь в трансформаторе 100 *ква* при различном исполнении обмотки НН. Для этого трансформатора обмотка НН выполняется в виде двухслойной цилиндрической катушки с масляным каналом между слоями. Технические данные этой катушки следующие:

Число витков в катушке 38
Число слоев 2
Число витков в слое 19
Размеры провода . . . . $\frac{7,4\times4,4}{7,9\times4,9}$ и $\frac{8\times4,4}{8,5\times4,9}$
Сечение провода . . . . 31,7 *мм*² и 34,3 *мм*²
Число проводов в параллели 2

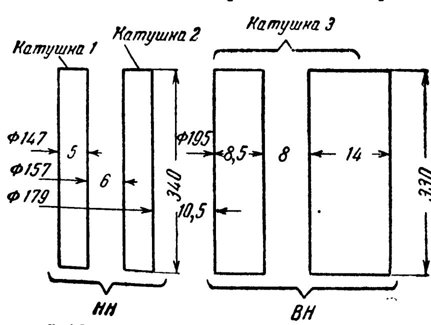
Размеры радиальные и осевые, а также диаметры и размеры каналов показаны на фиг. 5-18. Параллельные провода размещены друг над другом таким образом, как показано на фиг. 5-16. Для этого расположения катушек коэффициент $\rho_p = 0,95$. Тогда по формуле (2) приложения IX (лист 1) получим

$$\beta = \frac{0,44}{1,03}\sqrt{\frac{19(7,4+8)}{340}0,95} = 0,386 \approx 0,4$$

и по кривым фиг. ПIX-4 приложения IX (лист 4) найдем, что процент добавочных потерь равен около 1.

$$s = 1\%.$$

Если же, не изменяя размеров размещения слоев, показанных на фиг. 5-18, намотать каждый слой из 38 витков проводом $8 \times 4,4$, а оба слоя соединить в параллель, то прежде, чем подсчитывать добавочные потери, следует найти распределение тока в каждой ветви обмотки НН. Этот расчет следует производить по формуле для многообмоточных трансформаторов (см. приложение VIII, листы 4 и 5). Для этого обозначим слои обмотки НН как катушки *1* и *2*, а обмотки ВН как катушку *3* — фиг. 5-18 и рассчитаем напряжения рассеяния каждой пары катушек, приведенные к мощности катушки *3*, т. е. к 100 *ква*. Тогда для всех трех случаев значения намагничивающих сил $In = 38 \cdot 251 = 9\,540$ *ав* и вольт на виток $U/n = 3,5$ не будут изменяться, а средний диаметр $d_{cp} = 18,45$ *см* и высоту обмотки $H_к = 33,5$ примем тоже неизменными для всех трех случаев.

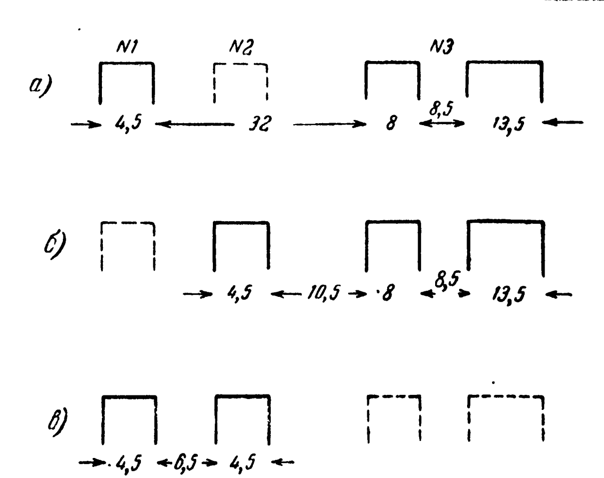


Фиг. 5-18. Расположение обмоток для числового примера расчета распределения тока в параллельных катушках.

Расчетные размеры катушек и каналов (от меди до меди) для всех трех случаев показаны на фиг. 5-19, *а*, *б* и *в*. Поэтому получим:

Для катушек *1* и *3*

$$c_{13} = 3,2 + 1/3\ (0,45 + 0,8 + 1,35) + 0,85\left(\frac{5}{8}\right)^2 = 4,4.$$



Фиг. 5-19. Схема для подсчета реактивного сопротивления многообмоточного трансформатора.

Здесь отношение $^5/_8$ есть отношение чисел слоев в одной части обмотки ВН к полному числу слоев всей обмотки ВН — см. формулу (3) приложения VIII (лист 1)

$$\lambda_{13}=3,2+0,45+0,8+1,35+0,85=6,65,$$

$$\rho_{13}=1-\frac{6,65}{\pi\, 33,5}=0,94,$$

$$u_{p\cdot 3}=\frac{38\cdot 251\cdot 18,45\cdot 4,4\cdot 0,94}{798\cdot 3,5\cdot 33,5}=7,8\%;$$

для катушек *2* и *3*

$$c_{23}=1,1+{}^1/_3\,(0,45+0,8+1,35)+0,85\left(\frac{5}{8}\right)^2=2,3;$$

$$\lambda_{13}=4,55;\quad \rho_{23}=0,96\quad u_{p23}=4,10\%.$$

Наконец, для катушек *1* и *2*

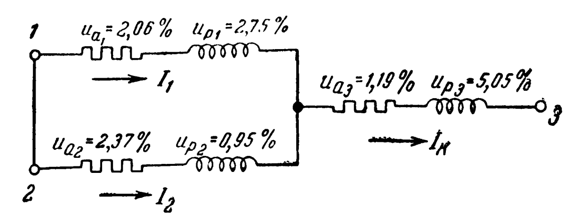
$$c_{12}=0,95;\quad \lambda_{12}=1,55;\quad \rho_{12}=0,99;\quad u_{p12}=1,8\%.$$

Для этих значений напряжений рассеяния трех пар обмоток найдем реактивные сопротивления эквивалентной трехлучевой схемы по формуле (11) приложения VIII (лист 5)

$$u_{p1}=\frac{1,8+7,2-4,1}{2}=2,75\%;\quad u_{p2}=\frac{1,8+4,1-1,8}{2}=-0,95\%;$$

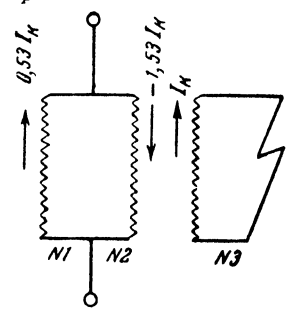
$$u_{p3}=\frac{1,8+4,1-1,8}{2}=5,05\%.$$

Для нашего случая параллельного соединения слоев обмотки НН видно, что в эквивалентной трехлучевой схеме (фиг. 5-20) лучи *1* и *2* должны быть соединены в параллель. Если бы мы пренебрегли оми-



Фиг. 5-20. Трехлучевая схема трехобмоточного трансформатора.

ческим сопротивлением наших эквивалентных лучей и весь расчет распределения токов произвели бы лишь на основании этих значений u_{p1}, u_{p2}, u_{p3}, то получилось бы слишком неоднородное распределение токов, при котором ток в катушке *1* имел даже обратное направление току в катушке *2* (фиг. 5-21). В этом случае получилось бы, что ток короткого замыкания $I_к$ не распределяется поровну по обеим ветвям, а в ветви, прилегающей к каналу рассеяния, ток становится в полтора раза больше, а во внешней ветви изменяет направление (фиг. 5-21). В этом случае, очевидно, потери в обмотке НН стали бы недопустимо велики.



Фиг. 5-21. Распределение токов для числового примера.

В действительности следует учесть еще активное сопротивление каждой половины обмотки НН. Активное падение напряжения необходимо тоже выразить в процентах при полезной мощности 100 *ква* в каждой ветви. Если предположить, что в каждом слое 38 витков из провода 8·4,4 сечением 34,3 *мм²*, то, учитывая средние диаметры 147 и 169 *мм* катушек *1* и *2*, получим вес медных проводов этих катушек см. формулу (1-2)

$$83,9 \cdot 38 \cdot 34,3 \cdot 147 \cdot 10^{-6} = 16,1 \text{ кг},$$

$$83,9 \cdot 38 \cdot 34,3 \cdot 169 \cdot 10^{-6} = 18,5 \text{ кг}.$$

Номинальный ток при 100 *ква* равен 251 *а*. Поэтому получаем, что плотность тока в каждой ветви была бы равна:

$$\frac{251}{34,3} = 7,3 \text{ а/мм}^2.$$

Поэтому активные потери в каждой ветви равны [см. формулу (5-5)]

$$2,4 \cdot 7,3^2 \cdot 16,1 = 2\,060 \text{ вт},$$

$$2,4 \cdot 7,3^2 \cdot 18,5 = 2\,370 \text{ вт}.$$

По формуле (5-5а) найдем, что активные падения напряжения каждой катушки были бы равны $u_{a1} = 2,06\%$; $u_{a2} = 2,37\%$, а для обмотки ВН $u_{a3} = 1,19\%$. Эти данные внесены в схему (фиг. 5-20). Тогда для всех ветвей можем составить выражения для полных сопротивлений

$$Z_1 = 2,06 + j\,2,75,$$

$$Z_2 = 2,37 - j\,0,95,$$

$$Z_3 = 1,19 + j\,5,05.$$

В данном случае ищется не полное сопротивление всей эквивалентной схемы, показанной на фиг. 5-20, а распределение тока $I_к$ между ветвями *1-0* и *2-0*. Очевидно,

$$I_1 Z_1 = I_2 Z_2,$$
$$I_1 + I_2 = I_к.$$

Тогда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{2{,}37 - \bar{j}0{,}95}{2{,}06 + \bar{j}2{,}75}$$

или после преобразования получим

$$\frac{I_1}{I_2} = 0{,}192 - j0{,}72.$$

Если условно считать, что $I_2 = 1$ (фиг. 5-22), то результирующий ток I_k получится равным

$$I_k = I_1 + I_2 = (0{,}192 - \bar{j}0{,}72)\, I_2 + I_2 = (1{,}192 - j0{,}72)\, I_2$$
$$|I_к| = 1{,}40\, |I_2|.$$

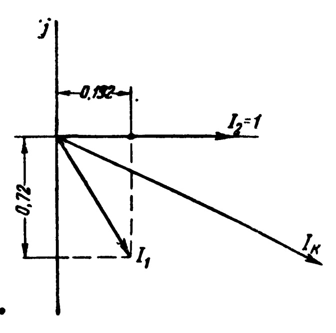
Кроме того, если $|I_2| = 1$, то $|I_1| = 0{,}745\, |I_2|$, ибо

$$I_1 = (0{,}192 - \bar{j}0{,}72)\, I_2.$$

Если все токи считать кратными току I_k, равному единице, то получим

$$|I_к| = 1,$$
$$|I_2| = \frac{1}{1{,}40}\, |I_к| = 0{,}716\, |I_к|,$$
$$|I_1| = 0{,}745 \cdot 0{,}716\, |I_к| = 0{,}5\ 4\, |I_к|.$$

Таким образом, получим, что в ветви *1* ток будет незначительно больше, чем при равномерном распределении токов. В ветви же *2* ток будет, более чем на 40%, больше тока равномерного распределения. Очевидно, что такое отступление от равномерного распределения нельзя считать допустимым и потому параллельное включение слоев цилиндрической катушки не применяется. Этот вывод, сделанный для данного частного случая, распространяется вообще на любые трансформаторы большой мощности. Это допустимо потому, что с увеличением мощности активное падение напряжения u_a падает, а реактивное падение напряжения либо остается без изменения, либо растет с увеличением первичного напряжения.



Фиг. 5-22. Векторная диаграмма токов для числового примера.

В тех случаях, когда магнитное поле рассеяния принимает более сложную форму и магнитные силовые линии искривляются, главным образом, из-за несимметрии расположении намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток, стремятся представить данное поле, как результат сложения двух полей простейшего типа. Так, на фиг. 5-7

показан способ разложения действительного поля на два— продольный поток $Ф_p$ и поперечный $\Delta Ф_p$. При этом предполагается, что оба эти потока могут быть изображены прямыми вертикальными и соответственно горизонтальными силовыми линиями. Каждый из этих потоков $Ф_p$ и $\Delta Ф_p$ должен вызывать в толще медных проводов вихревые токи. Считают, что добавочные потери от этих вихревых токов могут быть вычислены независимо друг от друга. Окончательные добавочные потери получаются как сумма добавочных потерь от продольного потока $Ф_p$ и от поперечного потока $\Delta Ф_p$. Расчет добавочных потерь от продольного потока $Ф_p$ ничем не отличается от приведенных ранее расчетов.

Что же касается подсчета потерь от поперечного потока $\Delta Ф_p$, то здесь возникают некоторые осложнения в связи с подсчетом числа слоев, оценкой амплитуды потока и вопросом, к каким номинальным потерям следовало бы отнести найденные проценты добавочных потерь. Поэтому формулы для расчета добавочных потерь после некоторых упрощений и преобразований были приведены к такому виду, что получилась возможность вычислять добавочные потери прямо в ваттах в функции от B_p — индукции потока рассеяния (в данном случае—индукции поперечного потока рассеяния $\Delta Ф_p$ — см. формулу (8) приложения IX (лист 3). В этом случае b — уже осевой размер провода. Обычно индукция поперечного потока рассеяния не остается постоянной по всей высоте обмотки, а изменяется прямолинейно от максимума до нуля. В этом случае считают, что среднее значение добавочных потерь приблизительно в три раза меньше, т. е. в формуле (8) приложения IX (лист 3) следует коэффициент 21,5 заменить коэффициентом, проблизительно равным 7,5. Для случая несимметрии витков с током, показанного на фиг. 5-7, расчет добавочных потерь от поперечного потока следует произвести для обеих обмоток.

5-4. РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ УСИЛИЙ

Механические усилия в обмотках возникают в силу того, что проводники, по которым идет ток, находятся в магнитном поле потока рассеяния. Усилие F, действующее на элемент тока idl определяется по формуле

$$F = Bidl, \tag{5-14}$$

где B—индукция в *гс*.

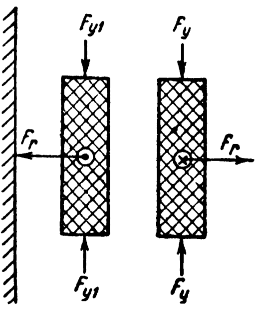
Если силу F требуется вычислить в *кГ*, то, подставляя индукцию в *гс* (ток в *а*, а dl — в *см*), формулу (5-14) следует писать в виде

$$F = 1{,}02\ Bidl \cdot 10^{-7}\ (кГ). \tag{5-15}$$

Эта формула чаще всего применяется при выводе различных формул для механических усилий.

Следует иметь в виду, что усилие направлено перпендикулярно плоскости векторов индукции B и тока i. Поэтому рассматривая общую схему фиг. 5-23 направления усилий, действующих на симметрично расположенные обмотки, необходимо считать что радиальные усилия F_r появятся под влиянием осевых составляющих индукции магнитного поля, а осевые силы F_y — под влиянием радиальных составляющих магнитного поля.

Радиальные усилия F_r [см. формулу (1) приложения X (лист 1)] выводятся наиболее легко для симметрично расположенных обмоток [Л. 2 и 7]. При этом выводе вместо формулы (5-14) пользуются также формулой приращения энергии магнитного поля при изменении ширины канала потока рассеяния. Формула (1) приложения X (лист 1) дает значение результирующей силы, которая стремится расширить канал рассеяния между первичной и вторичной обмотками. Очевидно, что витки, прилегающие к каналу рассеяния, будут подвергаться наибольшим, так сказать, «собственным» усилиям. С другой стороны, внешние витки внешней обмотки и внутренние витки внутренней обмотки должны испытывать наименьшие собственные усилия, так как они находятся там, где индукция потока рассеяния близка к нулю.



Фиг. 5-23. Направление „собственных" усилий равномерной обмотки.

Однако, усилия действующие на один слой витков, например, действующее на витки, прилегающие к каналу рассеяния, могут передаваться соседнему слою витков. Этот соседний слой оказывается, таким образом, под действием, с одной стороны, собственного усилия, зависящего от значения индукции потока рассеяния в том месте, где находится данный слой витков, а с другой стороны, — под действием радиального усилия, которое передается от предыдущего слоя витков. Таким образом, по мере удаления от канала рассеяния значение суммарного радиального усилия будет возрастать и в конечном итоге крайние — внешние и внутренние витки — будут испытывать наибольшее радиальное усилие F_r, равное сумме всех собственных усилий, действующих на все витки, расположенные в радиальном направлении. Эти соображения справедливы в том случае, если витки соседних слоев плотно прилегают друг к другу и между слоями нет вертикальных каналов.

Радиальное усилие F_r, определяемое по формуле (1) приложения X (лист 1), дает значение суммарного усилия всех

слоев обмотки. Поэтому значение этого радиального усилия должно быть положено в основу расчета прочности на разрыв витков внешней катушки или прочности на изгиб витков внутренней катушки. Необходимо иметь в виду, что радиальное усилие F_r есть некоторое условное результирующее усилие, равное алгебраической сумме радиальных нагрузок, равномерно распределенных по высоте и по периметру катушки.

Как показано на фиг. 5-23, на обмотки, кроме радиальных усилий, действуют еще сжимающие осевые усилия F_y и F_{y1}.

Значения этих усилий зависят от радиальных составляющих индукции потока рассеяния. В обычных симметричных обмотках значение коэффициента ρ_p [см. формулу (1) приложения VIII (лист 1)] для напряжения рассеяния очень близко к единице. Коэффициент ρ_p в среднем равен 0,95—0,96. Этот коэффициент учитывает искривление магнитного поля рассеяния, т. е. отклонение силовых линий от идеализированного прямолинейного вертикального направления. Таким образом коэффициент ρ_p характеризует кривизну поля, т. е. влияние радиальной составляющей индукции поля рассеяния. Эти соображения показывают, что радиальные составляющие индукции поля рассеяния будут весьма малы. Кроме того, из-за наличия стального стержня, притягивающего силовые линии потока рассеяния, сжимающее усилие F_{y1} для внутренней обмотки будет больше, чем F_y для внешней обмотки. Наибольшее собственное сжимающее усилие будет действовать на крайние витки. В середине высоты обмотки собственное сжимающее усилие равно нулю, но зато действует вся сумма усилий, действующих на все выше или нижележающие витки. Все же значение сжимающих усилий F_y и F_{y1} столь мало, что они обычно не подсчитываются.

Наибольшее значение имеют осевые усилия, возникающие из-за несимметрии распределения витков с током в одной обмотке по отношению к распределению витков с током в другой. На листах 2 и 3 приложения X даны формулы и кривые для подсчета этих усилий F_{ak}. Эти кривые подсчитаны по формулам, выведенным для плоско параллельного поля двух параллельных шин (подробнее [Л. 37 и 44]).

Как радиальные усилия, так и осевые усилия достигают наибольшего значения при коротком замыкании трансформатора. Поэтому усилия умножаются на квадрат кратности тока короткого замыкания $\left(\frac{100}{u_к}\right)^2$, где $u_к$ — напряжение ко-

роткого замыкания в процентах [см. формулу (2) приложения X (лист 1)]. Эти усилия при коротком замыкании в несколько сот раз превосходят усилия при номинальном токе. Поэтому при механическом расчете принимаются во внимание лишь токи короткого замыкания. Как известно, в первый момент после короткого замыкания на установившийся ток короткого замыкания накладывается затухающий постоянный ток переходного режима. Так, пусть в момент короткого замыкания время $t=0$ и пусть напряжение U равно [Л. 2 и 7]

$$U=U_m \sin(\omega t+\theta), \tag{5-16}$$

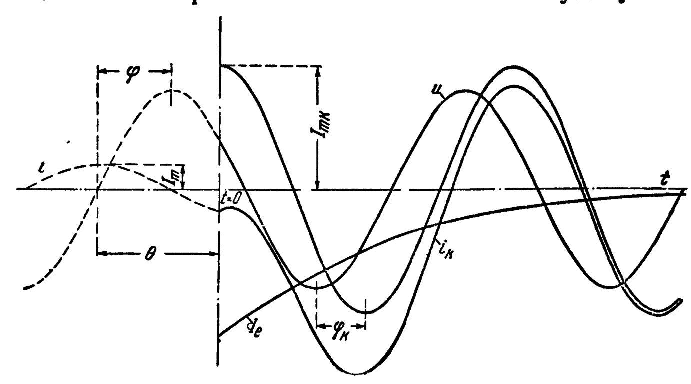
где угол θ характеризует значение напряжения в момент короткого замыкания;

U_m — амплитуда напряжения.

Кроме того, пусть ток i до момента короткого замыкания изменялся по формуле

$$i=I_m \sin(\omega t+\theta-\varphi), \tag{5-17}$$

где I_m — амплитуда тока, а φ — угол сдвига фаз тока и напряжения до момента короткого замыкания (фиг. 5-24). Пусть, наконец, после короткого замыкания амплитуда установив-



Фиг. 5-24. Кривые тока и напряжения при мгновенном изменении нагрузки.

шегося тока короткого замыкания будет равна I_{mk}, а угол сдвига фаз тока и напряжения после короткого замыкания равен φ_k. Тогда значение I_k полного тока короткого замыкания равно (фиг. 5-24)

$$I_k=I_{mk}\sin(\omega t+\theta-\varphi_k)+[I_m \sin(\theta-\varphi)-I_{mk}\sin(\theta-\varphi_k)]e^{-\frac{R_k}{L_k}t}, \tag{5-18}$$

где

$$\varphi_к = \operatorname{arc\,tg} \frac{\omega L_к}{R_к}, \qquad (5\text{-}19)$$

$\omega L_к$ и $R_к$ — индуктивное и активное сопротивления трансформатора при коротком замыкании.

Как известно, второй член правой части формулы (5-18) дает значение постоянной составляющей (свободный ток). Этот свободный ток будет наибольшим, если

$$\theta - \varphi_к = \frac{\pi}{2}. \qquad (5\text{-}20)$$

Свободный ток, хотя и быстро затухает, но все же в первый период увеличивает ток короткого замыкания. Если пренебречь значением I_m по сравнению с $I_{mк}$, то при условии, что $\theta - \varphi_к = \frac{\pi}{2}$, наибольшая амплитуда тока короткого замыкания будет приблизительно в момент, когда $\omega t = \pi$. В этом случае амплитуда тока короткого замыкания равна

$$I_к = -I_{mк}\left(1 + e^{-\frac{R_к}{L_к}\cdot\frac{\pi}{\omega}}\right). \qquad (5\text{-}21)$$

Очевидно, что

$$\frac{R_к}{\omega L_к} = \frac{u_a}{u_p},$$

где u_a и u_p — активное и реактивное падения напряжения в процентах. Обычно расчет усилий производится для этой максимальной амплитуды тока короткого замыкания, значение которой учитывается поправочным коэффициентом k в формуле 2 приложения X (лист 1), для которого там вычислена таблица в функции от отношения u_p к u_a. Этот расчет по наибольшей амплитуде переходного тока короткого замыкания дает, конечно, несколько завышенные значения тока, ибо составляющая свободного тока имеет одно и то же направление в обеих обмотках.

Как это ранее было указано, кривые для расчета осевых усилий были выведены для плоскопараллельного поля двух плоских шин. Согласно теоретическим работам, произведенным доктором технических наук Э. А. Мееровичем и Г. С. Аронзоном под руководством проф. Б. А. Телешева в лаборатории теоретической электротехники Энергетического института им. Г. М. Кржижановского при Академии наук СССР, при выводе формул осевых усилий было принято во внимание

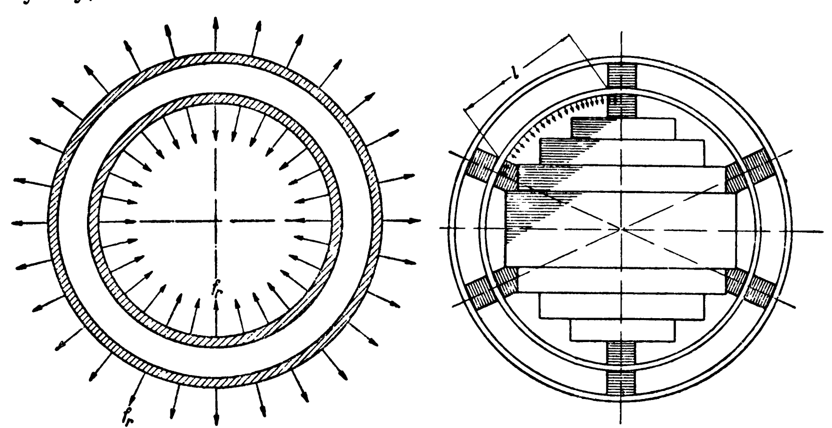
присутствие стали стержня и ярем, что и было учтено при расчете кривых для k_a в формуле (3) приложения X (лист 2). Эти теоретические работы показали, что присутствие стали особенно сильно сказывается на сжимающих усилиях при симметричном расположении обмоток. Осевые же усилия в присутствии стали оказываются почти одинаковыми как для внешней, так и для внутренней обмотки.

Эти теоретические работы и лабораторные опыты, а также опыт эксплоатации показали, что разрушающее действие усилий короткого замыкания зависит не только от этих расчетных величин, но в очень сильной мере от степени запрессовки обмотки, т. е. от того, представляет ли собою обмотка одно слитное тело или отдельные катушки имеют возможность перемещаться хотя бы в небольших пределах. В последнем случае весьма опасен резонанс механических колебаний витков с частотой усилий (100 *гц*). В этих условиях разрушение обмоток может произойти при усилиях, которые по обычному расчету вызывают неопасные напряжения в материале. Помимо этого большое значение имеет повторяемость толчков тока, хотя бы и неполных коротких замыканий. Хлопчатобумажная изоляция проводов весьма чувствительна к повторяющимся небольшим толчкам. Весьма опасна также усадка изоляционных картонов (усушка) в процессе работы трансформатора. Образующаяся при этом «слабина» может создать благоприятные условия для возникновения механических колебаний.

Таким образом, надежная прессовка обмоток, склеивающая способность хорошо запеченных пропиточных лаков, своевременная расклиновка обмоток для устранения усадочной слабины, в особенности в начальный период эксплоатации трансформатора, оказывают благоприятное влияние на механическую прочность обмоток трансформатора.

Радиальные и осевые усилия, действующие на обмотки, вызывают различные механические нагрузки проводов и изоляционных материалов. В обмотках концентрического типа радиальные усилия, равномерно распределенные по всему периметру обмотки, стремятся внутреннюю катушку прижать к стальному сердечнику, а внешнюю катушку разорвать (фиг. 5-25). Полученное по расчету радиальное усилие F_r представляет собой сумму всех радиально направленных нагрузок f_r как по периметру, так и по высоте обмоток. Внутренняя обмотка обычно бывает отделена от сердечника вертикальными рейками. Поэтому виток внутреннего слоя внутренней обмотки работает на изгиб под действием равномерно распределенной нагрузки, как криволинейный брус на нескольких опорах (фиг. 5-26). Этот виток, однако, находится в слабом магнитном поле потока рассеяния и потому собственные усилия, действующие на этот виток, будут малы. Для внут-

ренних обмоток низкого напряжения трансформаторов мощностью до 180—320 *квт* чаще всего применяются двухслойные цилиндрические катушки с каналом между слоями. Очевидно, что слой, прилегающий к главному каналу рассеяния, будет испытывать наибольшие сжимающие радиальные усилия. Это усилие будет равно $^3/_4$ от полного усилия, действующего на всю катушку, т. е. на оба слоя вместе. На самом деле, если через F_1 обозначить усилие, действующее на однослойную катушку, то, добавляя к этому слою еще второй, внешний по



Фиг. 5-25. Радиальные усилия — общая схема.

Фиг. 5-26. Радиальные усилия — изгиб провода внутренней катушки.

отношению к первому, такой же слой, получим, что общее усилие должно возрасти в 4 раза, т. е. оно будет равно 4 F_1. Но попрежнему на первый слой продолжает действовать усилие F_1, ибо мы не изменили ни ток, ни магнитное поле в первом слое. Поэтому на второй слой будет действовать усилие $4F_1 - F_1 = 3F_1$, т. е., если вести счет по отношению к полному усилию на всю катушку, то получим, что на второй слой будет действовать усилие, равное $^3/_4$ от полного усилия. Вообще, пользуясь этим методом, можно найти усилия, действующие на каждый слой многослойной катушки. Так, для трехслойной катушки общее усилие будет в 9 раз больше усилия, действующего на первый слой. Но на первый и второй слои, согласно предыдущему, действуют усилия $1F_1$ и $3F_1$. Следовательно, на третий слой действует усилие $[9-(3+1)]F_1 = 5F_1$. Вообще можно доказать, что при числе слоев, равном n, наибольшее усилие $F_{макс}$, действующее на слой, прилегающий к каналу рассеяния, равно

$$F_{макс} = \frac{2n-1}{n^2} F_r, \qquad (5\text{-}22)$$

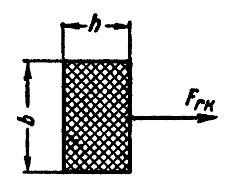
где F_r—радиальное усилие, определяемое по формуле (1) приложения X (лист 1). Возвращаясь к вопросу расчета усилий в цилиндрической катушке, возьмем данные примера № 2 трансформатора 100 *ква*.

В этом примере обмотка НН имеет 38 витков (2 слоя по 19 витков) из проводов 7,4×4,4 и 8×4,4 *мм*. Номинальный ток 251 *а*. Внешний диаметр цилиндрической катушки 174 *мм*, а средний диаметр этой катушки 158 *мм*. Осевой размер равен 340 *мм*. Тогда усилие F_r получается равным [по формуле (1) приложения X (лист 1)]

$$F_r = 12{,}8\,(38\cdot 251)^2 \frac{\pi\, 15{,}8}{34{,}0} \cdot 10^{-8} = 17{,}0 \text{ кГ}.$$

При короткои замыкании $u_к = 5{,}34$ и отношение $u_p/u_a = 2$, тогда $k^2 = 1{,}45$ радиальное усилие $F_{rк}$ возрастет до величины

$$F_{rк} = 1{,}45 \left(\frac{100}{5{,}34}\right)^2 17{,}0 = 8\,660 \text{ кГ}.$$



Фиг. 5-27. Сечение провода и радиальное усилие.

Как указано в расчетной записке примера № 2 в обмотке НН устанавливается 8 вертикальных реек. Как указано выше, усилие, действующее на внешний слой, равно $^3/_4$ полного усилия. Наконец, принимая во внимание, что в одном слое этой обмотки 19 витков, получим, что на один пролет одного витка внешнего слоя должно действовать суммарное радиальное усилие

$$F_{rк} = {}^3/_4 \frac{8\,660}{19\cdot 8} = 42{,}7 \text{ кГ}.$$

Этот виток состоит из двух проводов. Момент сопротивления W проводов равен

$$W = \frac{bh^2}{6} \text{ см}^3, \qquad (5\text{-}23)$$

где b и h — размеры (в *см*) сечения провода в направлениях, перпендикулярном и параллельном действию силы $F_{rк}$ (фиг. 5-27). В данном случае

$$b = 0{,}74 + 0{,}8 = 1{,}54 \text{ см},$$
$$h = 0{,}44 \text{ см}$$

и поэтому $W = 0{,}0496$ *см*³. С другой стороны, считая для упрощения один пролет длиною l (фиг. 5-26), как балку с закрепленными концами, получим, что наибольший момент $M_{макс}$ будет равен

$$M_{макс} = \frac{F_{rк}\, l}{12}. \qquad (5\text{-}24)$$

Данный случай отличается от случая, показанного на фиг. 5-26 тем, что число вертикальных реек равно 8 *мм* и рассматриваются условия работы внешнего слоя. Внутренний диаметр этого слоя 165 *мм*. Поэтому

$$l = \frac{\pi\cdot 16{,}5}{8} - 1{,}5 = 5 \text{ см}.$$

где 1,5 *см* — ширина опорной рейки, и, следовательно,

$$M_{макс}=\frac{42,7\cdot 5,0}{12}=17,8 \ кГ.см,$$

а максимальное напряжение на изгиб, определяемое как

$$k_b=\frac{M_{макс}}{W}, \qquad (5\text{-}25)$$

получится равным

$$k_b=\frac{17,8}{0,0496}\approx 360 \ кГ/см^2.$$

Обычно (напряжение на изгиб) допускается для меди не более 600—800 *кГ/см*², а для алюминия k_b не более 150—200 *кГ/см*².

Если внутренняя обмотка состоит из дисковых или им подобных катушек, т. е. непрерывных или спиральных катушек, то предыдущий расчет становится несколько более условным из-за того, что катушка при расчете рассматривается как одно сплошное тело. Катушка в действительности может быть подвергнута такой технологической обработке—сушке и пропитке лаком, в результате которой эта катушка будет по своему строению приближаться к монолитному строению. Тогда катушку можно рассчитывать на полные усилия F_{rk}, а для момента сопротивления [формула (5-23)] в качестве размера h брать полную радиальную ширину катушки. Обычно в этих случаях получаются напряжения на изгиб, довольно близкие к наибольшим допускаемым.

Если такое сплошное строение катушки не получилось при ее изготовлении, то расчет весьма сильно осложняется. Тогда приходится считаться с тем, что между витками имеется некоторый весьма малый зазор или этот зазор может меняться из-за возможной упрессовки изоляции (кабельной бумаги) под действием сил короткого замыкания. В этом случае нельзя говорить о полной передаче усилий с одного слоя на другой. Очевидно, что и тогда внешний по отношению к сердечнику и ближайший к каналу слой будет наиболее опасным, так как на него будет действовать наибольшее усилие.

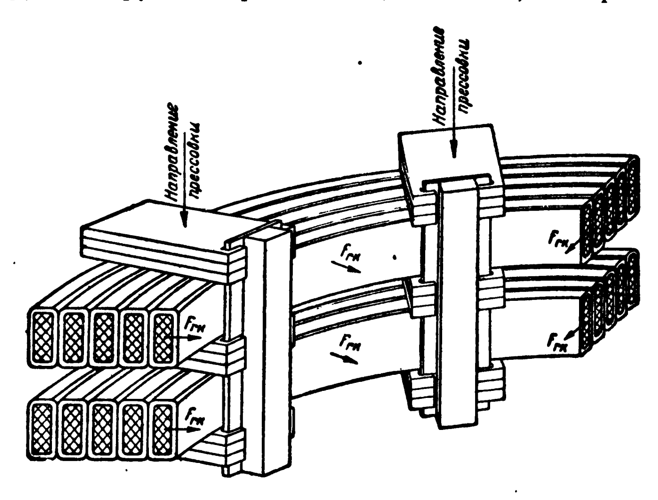
При большом числе слоев [формула (5-22)]

$$F_{макс}\approx\frac{2}{n}F_r,$$

т. е. это будет сравнительно небольшая доля полного усилия. Если же предположить, что следующий за внешним слоем другой слой так хорошо склеился с внешним, что образует с ним одно сплошное тело, то легко видеть, что в этом случае усилие, грубо говоря, на эти два слоя возрастет вдвое, а момент сопротивления увеличится в 4 раза. Отсюда следует,

что напряженность на изгиб таких двух склеившихся слоев упадет в 2 раза.

Однако, для внешнего слоя дисковой катушки затруднено определение длины пролета l, ибо заранее нельзя сказать, что внешний виток будет касаться следующего за ним витка, как раз на расстоянии, равном расстоянию между двумя соседними рейками. Поэтому, соглашаясь, с тем, что плотное касание этих двух витков может произойти в двух точках, отстоящих друг от друга на расстоянии, большем, чем расстояния



Фиг. 5-28. Часть катушки.

между соседними рейками, предполагают, что вертикальная прессовка обмоток (фиг. 5-28) в процессе изготовления и сборки обмотки обеспечивает плотное закрепление провода между прокладками. Тем самым фиксируется наибольшая длина пролета даже в том случае, если провод не лежит плотно на соседнем проводе.

При этих упрощающих предположениях все же обычно получается для внешнего слоя напряженность на изгиб в несколько раз (в 2—3 раза) больше допустимого, тогда как внутренний слой, на который всегда действует $\frac{1}{n^2}$ доля полного усилия (здесь n — число проводов в радиальном направлении) оказывается весьма слабо нагруженной. Поэтому можно считать, что при первом же толчке короткого замыкания внешние провода должны будут деформироваться. Эта деформация будет остаточной и она приведет к плотному касанию витков, хотя бы еще в нескольких дополнительных точках на длине пролета, что обуславливает, как это выше было показано,

более легкие условия работы проводов на изгиб при последующих толчках.

Но выше было также указано, что крайне нежелательна какая-либо «слабина» в креплении катушек, так как не исключена возможность резонанса собственной частоты механических колебаний катушки с частотой (100 *гц*) электромеханических сил для тока промышленной частоты (50 *гц*). Теоретически вопрос о частоте собственных колебаний катушек трансформаторных обмоток разработан весьма слабо. Поэтому здесь можно лишь указать на труды авторов, изучавших механические колебания других электрических аппаратов. Так, Ю. В. Буткевич, В. В. Михайлов и И. И. Ратгауз в книге о реакторах [Л. 40] указывают, что для отдельных проводов динамичность механической нагрузки скажется чрезвычайно слабо, так как период собственной частоты колебаний отдельного провода с обычными применяемыми пролетами весьма мал.

Если допустить, что провод внешнего слоя можно рассматривать как прямолинейную шину, закрепленную на жестких опорах, то ω_1 — частоту первой гармоники собственных колебаний можно подсчитать по формуле, приводимой инж. В. Б. Романовским [Л. 41] для медной шины прямоугольного сечения:

$$\omega_1 = 215 \cdot 10^4 \frac{h}{l^2}; \qquad (5\text{-}25)$$

здесь ω_1 — в радианах в секунду,

h — размер в *см* той стороны сечения провода, которая параллельна действующей силе (фиг. 5-27),

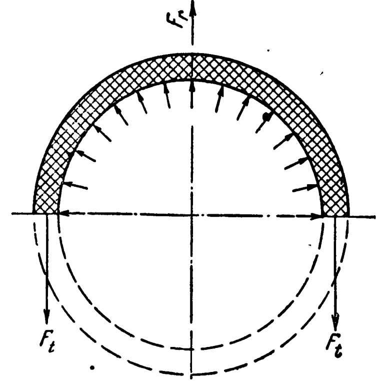
l — длина пролета в *см* (фиг. 5-26), т. е. расстояние между осями прокладок минус ширина одной подкладки. Если перевести угловую частоту ω_1 в частоту, выраженную в герцах, то получается

$$f_1 = 34{,}2 \cdot 10^4 \frac{h}{l^2}; \qquad (5\text{-}26)$$

здесь h и l обозначают те же размеры и имеют ту же размерность, что и в формуле (2-26). Расчеты по этой формуле показывают, что для обычных пролетов порядка 90—120 *мм* частота собственных колебаний одиночного провода получается порядка тысячи и более герц, т. е. провод находится довольно далеко от условий резонанса, чего нельзя сказать про катушку в целом, как это уже указывалось выше.

Некоторые другие труды, посвященные вопросу механических колебаний электрической аппаратуры, указаны в перечне литературных источников [Л. 39, 42 и 43]. Кроме того, можно указать еще на справочник по расчету собственных колебаний И. В. Ананьева [Л. 45].

Если рассматривать внешний виток внутренней непрерывной катушки как элемент оболочки, находящейся под действием внешней равномерно распределенной разгрузки, то получаются обычно преувеличенно хорошие результаты нагрузки меди проводов на сжатие. Этот способ расчета, рекомендуемый иногда в технической литературе и в заводских инструкциях, не может дать указаний о числе вертикальных опорных реек, расстояние между которыми имеет существенное значение при расчете на изгиб.



Фиг. 5-29. Цилиндрическая оболочка под действием внутреннего давления

Переходя к расчету действия механических усилий на внешние катушки, следует указать, что в этом случае всю катушку или отдельный виток можно уподобить оболочке, находящейся под действием внутренней равномерно распределенной нагрузки. Тогда тангенциональное усилие F_t (фиг. 5-29), стремящееся разорвать провод, найдется по формуле

$$F_t = \frac{F_r}{2\pi}, \qquad (5\text{-}27)$$

а напряжение на разрыв k_p медного провода будет равно

$$k_p = \frac{F_t}{q}, \qquad (5\text{-}28)$$

где q — сечение провода в $см^2$. Допускаемое напряжение на разрыв для медного провода берется равным 1100 $кГ/см^2$, а для алюминия 300 $кГ/см^2$.

Возьмем данные обмотки ВН примера № 5. Намагничивающая сила для средней ступени напряжения равна $29{,}7 \cdot 1\,048 = 3{,}13 \cdot 10^4$.

Средний диаметр и высота обмотки берутся те же, что и при подсчете напряжения рассеяния — см. РТ-5 (лист 3)

$$D_{ср} = 41{,}8 \ см \quad H_k = 63{,}0 \ см.$$

Тогда согласно формуле (1) приложения X (лист 1)

$$F_r = 12{,}8 \cdot 3{,}13^2 \frac{\pi\, 41{,}8}{63{,}0} = 262 \ кГ,$$

а так как по РТ-5 (лист 1)

$$\frac{u_p}{u_a} = \frac{6{,}4}{1{,}34} \approx 5,$$

то согласно таблице на листе 1 приложения X получим, что $k^2 = 2{,}25$ и потому по формуле (2) приложения X (лист 1) радиальное усилие при коротком замыкании будет равно

$$F_{rк} = 2{,}25\left(\frac{100}{6{,}56}\right)^2 \cdot 262 = 137\ 000\ кГ.$$

Отнесем это усилие лишь к главным катушкам $Г$ обмотки ВН, в которых 17 слоев. Тогда на первый слой, прилежащий к каналу рассеяния, будет действовать сила, равная [см. формулу (5-22)]

$$137\,000 \cdot \frac{2{,}17 - 1}{17^2} = 15\,650\ кГ,$$

а на первый слой одной из 56 катушек придается усилие

$$\frac{15\,650}{56} = 280\ кГ.$$

Согласно формуле (5-27) растягивающее усилие F_t равно

$$F_t = \frac{280}{6{,}28} = 44{,}6\ кГ.$$

Сечение провода обмотки ВН (РТ-5, лист 2) 6,65 $мм^2$, и потому напряжение на растяжение равно

$$k_p = \frac{44{,}6}{0{,}0665} = 670\ кГ/см^2.$$

Если этот расчет произвести для всех 17 проводов одной катушки, то для полного усилия на одну катушку

$$\frac{137\,000}{56} = 2\,450\ кГ,$$

напряжение на растяжение получилось бы еще меньшим, т. е. такой способ расчета дал бы преувеличенно хорошие разультаты.

Осевые усилия, вызванные несимметрией в распределении витков с током по высоте обмотки, а также появляющиеся из-за того, что витки с током в одной обмотке несимметрично расположены по отношению к виткам другой обмотки, подсчитываются по формуле (3) приложения X (лист 2). Эти усилия направлены так, что они стремятся усилить ту несимметрию, в силу которой они возникли. Можно также считать, что эти усилия появились под действием радиальной составляющей магнитного поля рассеяния, т. е. искривленное из-за указанных выше несимметрий магнитное поле рассеяния можно представить, как результат наложения друг на друга двух полей— осевого и поперечного (радиального), см. предыдущий параграф. Это радиальное поле и вызывает осевые усилия.

Если взять опять данные обмоток примера № 5, то для того, чтобы привести указанное в этом примере распределение н. с. к условному виду укороченной обмотки по фиг. X-2 приложения X (лист 2), применим нижеследующий искусственный прием. Обмотка ВН имеет уступчатую форму распределения витков с током, получившуюся из того, что в ка-

тушках *Б* меньше витков, чем в катушках *Г*, а также из-за того, что каналы между входными катушками равны 6 *мм* вместо 4 *мм* по всей остальной высоте обмотки. Заменим уступчатую форму (фиг. 5-30, *а*) соответствующим укорочением обмотки ВН. В ней в средней части 17 витков занимают $4+4{,}8=8{,}8$ *мм*. Две концевых катушки *Б* по 8,3 *мм* и 2 катушки *Г* с каналами 6 *мм* занимают по высоте

$$2\cdot 8{,}3+2\cdot 4{,}8+4\cdot 6=50{,}2\ мм.$$

Но на этой высоте размещено всего лишь

$$2\cdot 11+2\cdot 17=56\ витков,$$

которые должны были бы при равномерном распределении витков занимать по высоте

$$\frac{56}{17}\cdot 8{,}8=29\ мм.$$

Следовательно, можно считать, что необходимо удлинить на $x=29$ *мм* (фиг. 5-30, *б*) ту часть обмотки, где витки равномерно распределены, а, следовательно, условное укорочение обмотки ВН будет равно

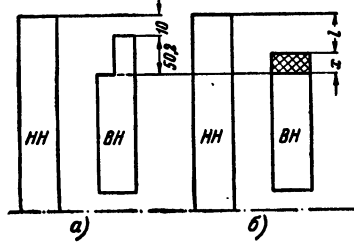
$$50{,}2-29=21{,}2\ мм.$$

Но так как обмотка НН длиннее на 10 *мм* обмотки ВН, то результирующее укорочение l будет равно 31,2. Тогда, считая, что

$$H_1=\frac{640}{2}=320\ мм,$$

получим, что

$$h=\frac{l}{H_1}=\frac{31{,}2}{320}=9{,}7\%\approx 10\%.$$



Фиг. 5-30. Преобразование обмотки с уступом.

Для расчета напряжения рассеяния (см. лист 3 примера РТ-5) было найдено, что $c=4{,}65$. Поэтому

$$\frac{H_1}{c}\doteq\frac{320}{4{,}65}\approx 70,$$

и на основании кривых приложения X (лист 3) получим, что

$$k_a=1{,}3.$$

Поэтому осевое усилие при коротком замыкании равно

$$F_a=1{,}3\cdot 0{,}097\cdot 137\,000=17\,300\ кГ.$$

Обмотка НН, которая в данном случае будет прижиматься к ярму, опирается на 12 прокладок (см. лист 2 примера РТ-5), имеющих ширину 30 *мм*. Радиальный же размер катушки НН равен 23,5 *мм*. Поэтому общая опорная поверхность обмотки НН равна

$$12\cdot 30\cdot 2{,}35=85\ см^2,$$

и, следовательно, давление на прокладку будет

$$\frac{17\,300}{85}=204\ кГ/см^2,$$

т. е. напряжение на сжатие электрокартона достигает предельного значения. Очевидно, что напряжение можно было бы понизить, если взять более широкие прокладки по 35 или 40 *мм*. Однако, это в данном случае вряд ли необходимо, так как осевые усилия, которые получатся из-за отключения регулировочных витков в обмотке ВН, будут стремиться отжать обмотку НН от ярма и, следовательно, уменьшать указанную выше нагрузку на прокладки.

Рассчитанное, таким образом, осевое усилие F_a (в данном примере 17,3 *т*) принимается как основная нагрузка при расчете прочности всех остальных механических деталей конструкции остова.

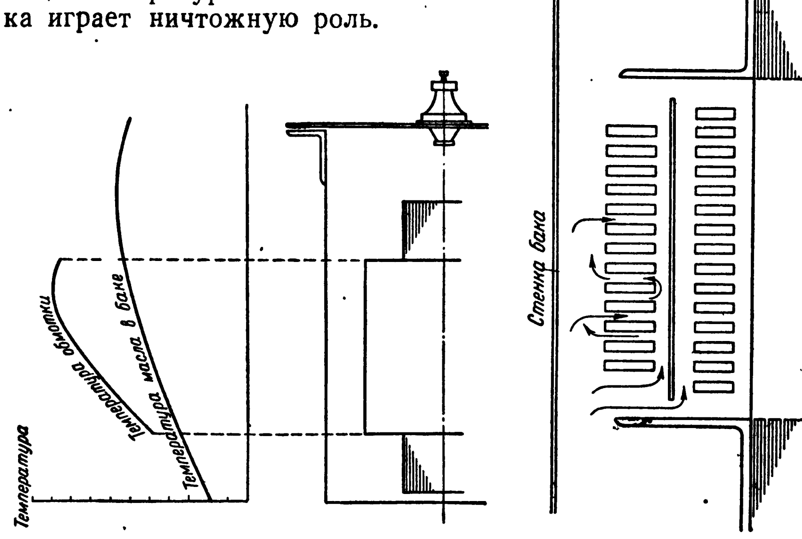
5-5. РАСЧЕТ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК И ТЕМПЕРАТУР

Для силовых трансформаторов нормируются температуры после длительной работы трансформатора при номинальной мощности. Таким образом, имеются в виду установившиеся температуры обмоток и масла трансформатора. Неустановившиеся тепловые режимы, т. е. такие условия работы трансформатора, при которых температуры изменяются в течение того или иного периода нагрузки, вообще говоря, не нормируются. В нормах предусматриваются лишь некоторые случаи перегрузок трансформаторов. Неустановившиеся тепловые режимы нормированы лишь для специальных типов трансформаторов — пусковых, заземляющих и т. п. В действительности же подавляющее большинство трансформаторов работает в условиях колеблющейся нагрузки и колеблющихся температур окружающей среды. Математическая обработка статистических данных о колебаниях нагрузок и о колебаниях температур окружающей среды позволяет составить типовые годовые, квартальные, среднесуточные и тому подобные графики нагрузки и графики температур окружающей среды. Вопрос о соответствии трансформатора той или иной стандартной мощности длительной нагрузке по тому или по иному ожидаемому графику нагрузки и при тех или иных температурах окружающей среды решается проектирующими или эксплоатирующими организациями с учетом постепенного старения изоляции под действием температуры и трансформаторного масла [Л. 50]. Эти вопросы, а также вопросы расчета неустановившихся тепловых режимов трансформатора выходят за намеченные рамки этой книги.

При установившейся температуре обмоток и масла трансформатора (в дальнейшем всюду, где это особо не оговорено, имеются в виду трансформаторы с масляным охлаждением) количество тепла, выделяемого потерями энергии в трансформаторе, равно количеству тепла, отводимого от трансформатора. При неустановившемся режиме количество отводимого тепла может быть больше или меньше выделяемого.

При естественном масляном охлаждении (при установив-

шемся тепловом режиме) отвод тепла от стенок бака трансформатора происходит при помощи конвекции воздуха и лучеиспускания. Очевидно, что от стенок бака должна быть отведена сумма потерь $P_{ст}$ в стали остова и $P_{м}$ — в медных проводах и $P_{доб}$ — всех добавочных потерь. Отвод тепла потерь в медных проводах $P_{м}$ от поверхности обмоток маслом трансформатора происходит при помощи конвекции. Лучеиспускание в масле при небольшой разнице температур обмоток и стенок бака играет ничтожную роль.



Фиг. 5-31. Распределение температур в масле и обмотке трансформатора.

Фиг. 5-32. Движение масла в обмотках.

Законы лучеиспускания, а также конвекции в воздухе и в масле достаточно хорошо изучены. Однако, применение этих опытных данных для расчета температур обмоток трансформатора осложняется целым рядом обстоятельств. Превышение температуры обмотки над температурой масла не постоянно, но та и другая температуры увеличиваются по мере движения вверх от дна бака до крышки бака (фиг. 5-31). Конструктивные формы охлаждаемых поверхностей и условия подхода масла или воздуха к этим поверхностям сильно затрудняют простое применение законов конвекции. Например, для непрерывной катушки, состоящей из ряда горизонтальных дисков, охлаждаемыми поверхностями будут горизонтальные поверхности дисковых катушек, причем подход масла к внутренним виткам будет весьма затруднен. Кроме того, существенное значение будет иметь также и то обстоятельство, будет ли

эта катушка внешней или же снаружи вокруг нее размещена другая обмотка на изоляционном цилиндре. У последней имеется гораздо больше возможностей обмениваться маслом с внешним объемом и получать оттуда более холодные порции масла взамен нагревшихся, как это показано схематически на фиг. 5-32. Но то масло, которое вошло в пространство между внешним цилиндром и внутренним цилиндром и обмоткой, должно подниматься до верха, не подпитываясь со стороны свежими порциями масла. Поэтому условия охлаждения внутренней обмотки будут более тяжелыми. Наконец, в целом ряде типов катушек тепло от какого-либо витка не непосредственно отдается трансформаторному маслу, а должно еще пройти некоторый путь сквозь толщу катушки. В этом случае должно получиться еще какое-то дополнительное повышение температуры от поверхности обмотки до данного витка. Эта особенность характерна для слоевых и секционных катушек.

В силу этих условий при расчете температур обмоток пользуются опытными данными, полученными для каждого типа обомоток. Обычно по этим опытным данным рассчитываются средние значения температур, получаемые путем определения изменения активного сопротивления обмоток постоянному току. Таким образом, эти средние значения температур включают в себя изменения температуры, как по высоте, так и по толщине катушки. Эти опытные данные могут быть получены при испытании на нагрев готовых трансформаторов.

Распределение температур как по высоте, так и толщине обмоток определяется на опытных моделях обмоток, внутри и на поверхности которых устанавливается соответствующее количество термопар. Эти испытания показали, что для обычных типов конструкции обмоток силовых трансформаторов температура наиболее горячей точки обмотки примерно на 5—6° С выше средней температуры, измеренной по изменению активного сопротивления. Наиболее горячая точка обычно находится на высоте, равной 0,7—0,75 от полной высоты обмотки, а в радиальном направлении — ближе к внутреннему краю катушки, примерно на расстоянии 0,2—0,3 радиального размера катушки, если катушка имеет охлаждающие каналы с внутренней стороны. В обмотках специальных трансформаторов, например измерительных трансформаторов напряжения, для которых применяются очень тонкие провода диаметром 0,2—0,15 *мм* и в обмотке которых имеется большее число слоев, наблюдаются несколько большие разницы температур между средней температурой и температурой наиболее горячей точки. Эта разница в сильной степени зависит от числа слоев обмотки и толщины изоляции проводов и междуслойной изоляции.

Входные катушки трансформаторов на напряжение 35 *кв* и выше изготовляются из проводов с усиленной изоляцией. Для того, чтобы эти катушки не перегревались, приходится применять провода, для которых плотность тока составляет примерно 0,8—0,6 от плотности тока в главной части обмотки. Тем самым компенсируется более высокий перепад температуры по толщине изоляции проводов. Если эти катушки дополнительно еще изолируются кабельной бумагой или лакированным полотном, то плотность тока в этих катушках понижается до 0,6—0,3 от плотности тока главной части обмоток.

Опытные данные по нагреву обмоток дают значения среднего превышения температуры обмоток над средней температурой масла в зависимости от удельной тепловой нагрузки q поверхности обмотки, т. е. от количества тепла, отводимого с единицы поверхности обмотки. Удельная тепловая нагрузка q измеряется в ваттах на квадратный метр поверхности обмоток. Аналогичным образом опытные данные по нагреву масла даются в виде зависимости от удельной тепловой нагрузки поверхности бака средней или максимальной температуры масла.

Во всех этих случаях определение понятия — поверхность, отдающая тепло — наиболее спорное понятие. Особенно много вносится условностей при расчете поверхности охлаждения бака и поверхности охлаждения остова трансформатора. Поэтому при пользовании теми или иными кривыми, дающими превышения температур, всегда надо предварительно установить, каким способом подсчитывается поверхность, т. е. какие условности внесены при подсчете охлаждающей поверхности.

Наиболее просто подсчитываются поверхность охлаждения у цилиндрических катушек. В этом случае охлаждающими поверхностями считаются только цилиндрические поверхности по высоте $H_к$ (фиг. 3-9) самой обмотки. Торцевые поверхности в расчет не берутся, так как они обычно бывают закрыты опорными кольцами (фиг. 3-9).

Размер $H_к$ соответствует расчетной высоте обмотки, хотя, учитывая опорные кольца, катушка по внешнему виду имеет высоту, несколько большую, равную длине изоляционного цилиндра. В том случае, если обмотка непосредственно намотана на изоляционный цилиндр (фиг. 3-30) считают, что изоляционный цилиндр имеет столь большое тепловое сопротивление, что сквозь него пройдет незначительное количество тепла, которым можно пренебречь. Таким образом, считают, что при толщине цилиндра 2 *мм* и более, поверхность обмотки, непосредственно прилегающая к цилиндру, не является теплоотдающей поверхностью и в расчет не принимается. Поэтому

обмотка, изображенная на фиг. 3-30, имеет лишь 3 поверхности, с которых отводится тепло, — 2 стороны канала и наружная поверхность.

Как указывалось ранее, канал между слоями цилиндрической катушки получается путем установки вертикальных реек из изоляционного материала. Кроме того, эти рейки накладываются и на наружную поверхность катушки для того, чтобы создать должное расстояние между обмотками ВН и НН. Считают, что те части поверхности, которые закрыты этими рейками, не отдают тепла маслу. Поэтому при расчете теплоотдающей поверхности катушки, из общей цилиндрической поверхности вычитают поверхность, закрытую рейками.

Цифровые расчеты для цилиндрических обмоток приведены на листах 3 расчетов РТ-1, РТ-2 и РТ-3. Здесь коэффициент 9,42 (РТ-2 и РТ-2) равен $3\pi = 9{,}42$.

Коэффициент 1,5 учитывает то, что внутренняя поверхность цилиндрической катушки, прилегающая к стальному сердечнику, частично закрыта тонкими электрокартонными листами толщиной 0,5 *мм*. Кроме того, здесь ставятся распорные рейки, определяющие расстояние обмотки от сердечника. Поэтому считают, что эта поверхность принимает меньшее участие в теплоотдаче. Эти соображения учитываются таким образом, что внешняя поверхность оценивается коэффициентом 1, а внутренняя поверхность оценивается коэффициентом 0,5, и, таким образом, вместо двух поверхностей считают, что катушка имеет 1,5 теплоотдающих поверхности.

Аналогичным образом в РТ-2 (лист 3) считается, что катушка НН имеет не 4, а 3,5 поверхности.

Следующие 2 цифры суть средние диаметры и высоты $H_к$ обмоток в *м*:

РТ-1 $D_{ср} = 0{,}163$ *м*; $H_к = 0{,}345$ *м*;

РТ-2 $D_{ср} = 0{,}158$ *м*; $H_к = 0{,}33$ *м*.

Из полученных значений поверхностей цилиндров вычитываются поверхности реек (8 шт. на фазу) шириной 15 *мм* и закрывающих обмотку по всей высоте $H_к$. Кроме того, учитывается число поверхностей, соприкасающихся с рейками (3 поверхности для РТ-2 и 3).

В примере РТ-3 введена некоторая другая условность счета, а именно расчет ведется не по среднему диаметру всей катушки, а для внутреннего слоя берется 1,5 поверхности и внутренний диаметр обмотки, а для внешнего слоя — внешний диаметр (просто потому, что эти две цифры диаметров только что были получены при расчете радиальных размеров трансформатора) и 2 поверхности. Оба эти способа не дают существенной разницы в результатах определения поверхностей.

Для слоевых обмоток способ подсчета поверхностей остается точно такой же. Здесь можно рассчитывать поверхности и по среднему диаметру (0,220 и 0,2235 в РТ-1 и РТ-2) или для каждой из трех поверхностей определять свой диаметр (РТ-3— см. трехчлен в скобках при подсчете поверхности обмотки ВН). Следует иметь в виду, что у обмоток ВН внешняя поверхность остается полностью открытой и с рейками соприкасаются лишь 2 поверхности. Поэтому во всех примерах (см. РТ-1, РТ-2, РТ-3 листы 3) после цифры 8 (число реек на фазу) стоит цифра 2, тогда как при расчете обмотки НН с масляным каналом между слоями после цифры 8 стоит цифра 3.

Для того, чтобы получить q — удельную тепловую нагрузку, — надо потери данной обмотки разделить на найденное значение теплоотдающей поверхности.

Так, для РТ-1 получим:

для обмотки ВН $q=\frac{1\,235}{1,85}=670,$

для обмотки НН $q=\frac{940}{0,675}=1\,400.$

Для непрерывных и спиральных катушек, состоящих из отдельных дисков, расчет поверхности или непосредственно q удельной тепловой нагрузки ведется лишь для одного диска с наибольшим числом витков. Вывод формулы для непосредственного подсчета удельной тепловой нагрузки дисковой катушки получается весьма просто из условия

$$q=\frac{2,4\cdot\delta^2 G}{F};\qquad (5\text{-}22)$$

здесь δ — плотность тока в $a/мм^2$ и $G_м$ — вес медных проводов данной катушки.

Тогда очевидно, что числитель дает потери в данной катушке. В знаменателе стоит F — поверхность в $м^2$. Очевидно, что

$$G_м=8,9\pi D_{ср}S\cdot10^{-6},\qquad (5\text{-}30)$$

$$F=\pi\cdot D_{ср}p_к\cdot10^{-6};\qquad (5\text{-}31)$$

здесь 8,9 $кГ/дм^3$ — удельный вес меди;
$D_{ср}$ — средний диаметр в $мм$;
S' — сечение всех проводов в катушке в $мм^2$;
$p_к$ — периметр катушки в $мм$ (фиг. 5-33).

Подстановка формул (5-30) и (5-31) в формулу (5-29) дает

$$q=\frac{2,4\delta^2\cdot8,9\pi D_{ср}S\cdot10^{-6}}{\pi D_{ср}p_к\cdot10^{-6}}=21,4\frac{In\cdot\delta}{p_к},\qquad (5\text{-}32)$$

здесь очевидно, что

$$\delta \cdot S = In,$$

где In — полный ток данной катушки.

В формулу (5-32) вносятся еще два добавления. Учитываются коэффициентом $\left(1+\frac{s}{100}\right)$ добавочные потери в медных проводах (s — процент добавочных потерь). В знаменателе вводится еще коэффициент k, учитывающий частичное закрытие катушки прокладками, т. е. в формуле (5-31) надо брать не полную длину πD_{cp}, а некоторую ее долю $k\pi D_{cp}$, где $k < 1$.

Обычно

$$0{,}65 < k < 0{,}8.$$

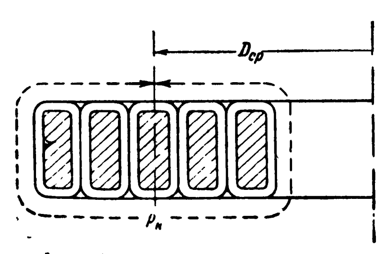
Если m — число прокладок по окружности катушки, а s_p — их ширина, то

$$k = 1 - \frac{ms_p}{\pi D_{cp}}. \quad (5\text{-}33)$$

Таким образом,

$$q = 21{,}4 \frac{In\delta}{p_\kappa k}\left(1+\frac{s}{100}\right), \quad (5\text{-}34)$$

т. е. удельная тепловая нагрузка пропорциональна плотности тока и полному току и обратно пропорциональна периметру, омываемому маслом. В примерах РТ-4 и РТ-5 удельная поверхностная нагрузка подсчитывалась по формуле (5-34)



Фиг. 5-33. Разрез дисковой катушки.

Формулу (5-34) можно применить и для расчета удельной тепловой нагрузки цилиндрических или слоевых катушек, если вместо p_κ — периметра катушек, подставлять высоту катушки H_κ, поскольку считается, что торцы этих катушек отводят ничтожно малое количество тепла. Кроме того, высоту катушки H_κ следует умножить на число теплоотдающих поверхностей (1,5 для РТ-1 и 3,5 для РТ-3,5). Так же, как и для дисковых катушек, коэффициент закрытия k должен быть относительной величиной и зависеть [см. формулу (5-33)] от отношения суммарной ширины реек к суммарной длине окружностей всех теплоотдающих поверхностей.

Упрощая далее формулу (5-34), можно вообще весь расчет удельной тепловой нагрузки вести, исходя из значений тока

I, плотности тока δ и омываемого периметра p всего-навсего одного провода. Тогда в формуле (5-34) p будет омываемая маслом высота (в цилиндрических катушках) или ширина (в дисковых катушках) одного провода, а $n=1$, если в катушке один слой. Если в катушке несколько слоев, то n — равно числу слоев.

Для расчета среднего превышения температур обмоток под средней температурой масла можно пользоваться данными таблицы приложения XI (лист 1). Очевидно, что температура обмотки зависит также от того, какое превышение температуры имеет масло над температурой окружающего воздуха. Практика конструирования трансформаторов показала, что наиболее целесообразным оказывается такое распределение превышений температур обмотки над маслом и масла над воздухом, при котором на долю среднего превышения температуры обмотки над средней температурой масла приходится 25—30° С, т. е. когда удельные тепловые нагрузки находятся в пределах 1 200—1 600 *вт/м²*. Очень часто при расчетах обмоток ориентируются именно на эти предельные значения удельных тепловых нагрузок и не производят дальнейших расчетов температур. Кстати, можно указать, что для трансформаторов с принудительной циркуляцией масла, т. е. тогда, когда масло перекачивается насосом из бака трансформатора в охладитель для масла, считается, что удельные тепловые нагрузки могут быть взяты равными 2 500—3 000 *вт/м²*.

Возвращаясь к определению превышений температур обмоток, рассчитанных в примерах, легко видеть, что для этого расчета надо найти отношение рассчитанного значения удельной тепловой нагрузки к условному уровню 1 000 *вт/м²*. Тогда в таблице приложения XI (лист 2) находится коэффициент, на который надо умножить превышения температур, указанные в предыдущей таблице того же приложения.

Так, для обмотки НН примера РТ-3 находим, что отношению

$$\frac{1\,175}{1\,000} = 1{,}175$$

соответствует коэффициент 1,14 и, следовательно, среднее превышение температуры обмотки НН будет равно

$$\tau_c = 22 \cdot 1{,}14 = 25°\mathrm{C}.$$

Для обмотки ВН примера РТ-2 находим, что отношению

$$\frac{650}{1\,000} = \frac{1}{\frac{1\,000}{650}} = \frac{1}{1{,}18}$$

соответствует коэффициент 0,876 и поэтому среднее превышение температуры обмотки ВН будет равно

$$\tau_c = 22 \cdot 0{,}876 = 19{,}5^\circ\ \text{C}.$$

Аналогичным образом рассчитаны средние превышения температур обмоток и в других примерах.

Как известно, температура обмоток $t_м$, предельные значения которой указаны в таблице приложения XI (лист 1), получается как сумма

$$t_м = \tau_м + \vartheta + t_{воз},$$

где $\tau_м$ — превышение температуры обмоток над температурой масла;

ϑ — превышение температуры масла над температурой окружающей среды;

$t_{воз}$ — температура окружающей среды.

Для последней нормировано значение

$$t_{воз} = +35^\circ\text{C}.$$

Так как $t_м$ тоже нормировано [см. таблицы приложения XI (лист 1)—для масляных трансформаторов $t_м = 105^\circ\text{C}$], а $\tau_м$—найдено при предыдущем расчете обмотки, то получается, что превышение температуры масла над температурой окружающей среды является уже заданной величиной. Поэтому тепловой расчет бака обычно ведется, не исходя из заданных удельных тепловых нагрузок, а исходя из заданного превышения температуры масла. Таким образом, видно, что необходимо решить следующую задачу, — найти размеры бака и соответствующих охлаждающих устройств (например волн или труб, или радиаторов и т. п.) для того, чтобы отвести заданное количество потерь при заданном значении превышения температуры масла.

Решение этой задачи обычно облегчается тем, что размеры бака в плане фактически уже являются заданными, так как известны размеры в плане самого трансформатора или, как говорят, «выемной части трансформатора» (заводский термин «выемная часть» обозначает остов трансформатора с катушками и отводами). Практика конструирования трансформаторов показывает, что для размещения отводов от обмоток и достаточной их изоляции как от остова, так и от бака, необходимы следующие примерные расстояния от обмоток до стенок бака, указанные в табл. 5-1.

Известно также, что для получения необходимой поверхности бака, с которой должна происходить отдача тепла от масла воздуху, целесообразнее всего задаться указанными

Таблица 5-1

Рабочее напряжение обмоток в *кв*	6	10	35	110
Расстояние до стенки бака от обмотки на стороне, где расположены отводы, в *мм*	30—50	40—60	120—160	300—400
От обмотки на стороне, где нет отводов, в *мм*	30	30	80—100	200—250

выше минимальными размерами в плане и подбирать высоту баку. Другой путь, а именно увеличение размеров бака в плане приводит обычно к менее экономичным решениям.

В приложении XI на листе 3 даны некоторые значения удельной тепловой нагрузки для различных типов охлаждающих устройств бака. Для облегчения выбора типа конструкции бака можно указать, что гладкие баки применяются лишь для самых малых мощностей и, начиная от 30—50 *ква*, приходится переходить на волнистые или трубчатые баки. Последние предпочтительнее, как более надежные при перевозках трансформатора — сварочные швы волнистых трансформаторов легко повреждаются при неумелом обращении с трансформатором при погрузках и разгрузках трансформатора с вагонов на машины и с машин на место установки.

Трубчатые баки с числом рядов труб более двух стараются уже не применять, так как при большем числе рядов труб сильно усложняются процессы приварки труб. Поэтому, начиная примерно с 2 000 *ква* и выше, приходится применять радиаторные баки.

Принудительное охлаждение в виде обдувки трансформаторов вентиляторами («дутьевое охлаждение») получило наибольшее распространение из всех видов принудительного охлаждения. Дутье применяют, начиная от 10 000—15 000 *ква*, хотя при напряжении 220 *кв* вполне экономичной и удобной для эксплоатации получается конструкция с естественным воздушным охлаждением, т. е. радиаторы без дутья.

В качестве примера расчета бака возьмем расчетные данные трансформатора РТ-3. Размеры в плане бака трансформатора можно легко определить, исходя из расстояния осей стержней 290 *мм* и пользуясь указаниями табл. 5-1. Тогда по ширине бак должен иметь размеры

$$290 + 2 \cdot 40 = 370 \text{ мм},$$

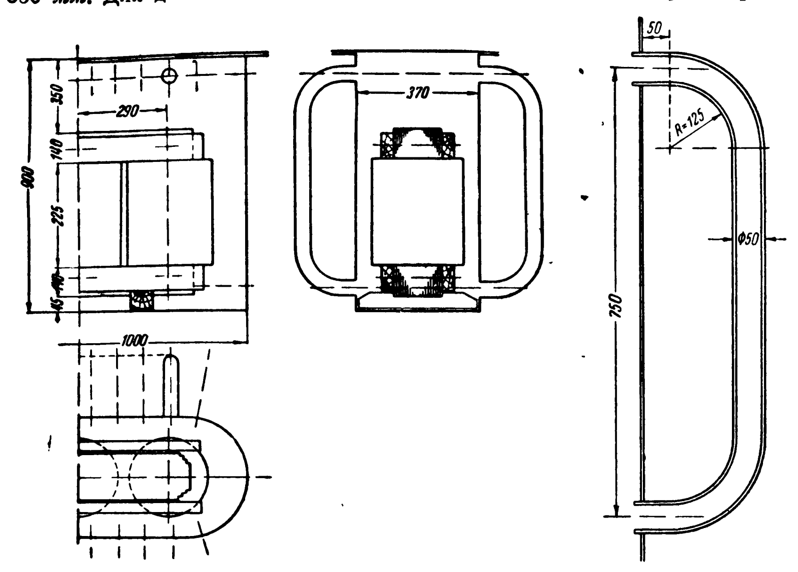
а по длине

$$3 \cdot 290 + 2 \cdot 50 = 970 \approx 1\,000 \text{ мм}.$$

Для сердечника с диаметром 155 *мм* высота ярма не будет больше 140 *мм*. Высота окна равна по расчету 225 *мм*. Тогда высота остова получится равной

$$2 \cdot 140 + 225 + 45 \approx 550 \text{ мм}.$$

Здесь 45 *мм* расстояние от дна бака до ярма (фиг. 5-34). На этом рисунке показано также, что расстояние от дна до крышки бака взято 900 *мм*, т. е. для размещения отводов и изоляторов взято над ярмом 350 *мм*. Для данной высоты бака 900 *мм* расстояние между отверстиями



Фиг. 5-34. Расположение трансформатора 100 *ква* в баке.

Фиг. 5-35. Деталь-труба бака.

труб по высоте надо взять равным 750 *мм*. На фиг. 5-35 показаны необходимые для расчета детали закруглений и вылета труб диаметром 50-51 *мм*. Расчетная длина такой трубы равна $\approx 1\,000$ *мм*.

Тогда получаем следующие размеры теплоотдающих поверхностей (фиг. 5-34).

Стенка бака

$$(1\,000 - 370)\cdot 2 + \pi\cdot 370 = 2\,425\ мм,$$

$$2{,}425\cdot 0{,}9 = 2{,}2\ м^2;$$

крышка бака

$$(0{,}63\cdot 0{,}37) + 0{,}785\cdot 0{,}37^2 = 0{,}44\ м^2.$$

На каждой стенке бака размещаем по 10 труб. Поверхность этих труб, при длине одной трубы 1 000 *мм*, будет равна

$$1{,}0\cdot\pi\cdot 0{,}05\cdot 20 = 3{,}14\ м^2.$$

Общая поверхность равна

$$2{,}2 + 0{,}44 + 3{,}14 = 5{,}78\ м^2.$$

Согласно данным приложения XI лист 3 при превышении $\vartheta_{ср}$ средней температуры масла над температурой окружающей среды в 50° С удельная тепловая нагрузка бака с одним рядом труб будет равна

$$12\cdot 50 = 600\ вт/м^2.$$

Поэтому данный бак при $\vartheta_{cp} = 50°$ C может отвести

$$5{,}78 \cdot 600 = 3\,470 \text{ вт.}$$

По расчету потери равны 3 064 *вт*, но приходится считаться с тем, что в процессе изготовления трансформатора могут быть некоторые отклонения значения потерь от расчета в пределах допуска установленного стандарта. Поэтому можно считать, что для данного типа трансформатора бак надо рассчитывать на суммарные потери со стандартным допуском 10%, т. е. на 3 300 *вт*.

Тогда согласно таблице приложения XI (лист 2) найдем, что отношению

$$\frac{1}{\frac{3\,470}{3\,300}} = \frac{1}{\frac{1}{1{,}05}}$$

соответствует коэффициент для превышения температур

$$\frac{0{,}968 + 0{,}955}{2} = 0{,}961,$$

т. е. при потерях 3 300 *вт* превышение средней температуры масла над температурой окружающей среды равно

$$50 \cdot 0{,}961 = 48° \text{ C.}$$

Превышение температуры обмоток будет равно (см. РТ-3)

обмотки ВН $\quad 23 + 48 = 71°$ C,
обмотки НН $\quad 25 + 48 = 73°$C.

При расчетных же потерях 3 064 *вт* отношение

$$\frac{1}{\frac{3\,470}{3\,064}} = \frac{1}{\frac{1}{1{,}13}}$$

даст коэффициент

$$\frac{0{,}912 + 0{,}9}{2} = 0{,}906,$$

и превышение средней температуры масла будет равно

$$50 \cdot 0{,}906 = 45{,}5°\text{C},$$

а превышение температур обмоток НН было бы равно

$$25 + 45{,}5 = 70{,}5° \text{ C.}$$

Отсюда следует, что для получения надежных условий охлаждения этого типа следовало бы добавить по одной трубе на каждую сторону бака.

Для бака с двадцатью трубами и при потерях 3 300 *вт* превышение температуры масла в верхних слоях было бы равно

$$48 \cdot 1{,}2 = 57{,}5° \text{ C.}$$

Поправка по отношению высот бака и остова в данном случае была бы порядка 2° C, так как высота столба масла над ярмом больше половины высоты остова.

Не проделывая детальных расчетов, можно сказать, что для трансформатора по примеру РТ-5 потребовался бы бак с внутренними размерами в плане

$$850 \div 880 \times 1\,800 \div 1\,900 \text{ мм}$$

и высотой около 2 200 ÷ 2 400 *мм*. У этого трансформатора пришлось значительно увеличить расстояние от ярма до крышки бака, доведя его примерно до 800 ÷ 1 000 *мм*. Только в этом случае при трех рядах труб можно ожидать, что получатся приемлемые превышения температур масла и обмоток.

Отвод тепла потерь от сердечника трансформатора весьма сильно осложняется, с одной стороны, условиями подхода масла к поверхностям сердечников, а с другой стороны, — неоднородным строением сердечника, т. е. наличием изоляции между листами стали.

Наиболее доступным для масла являются верхние и нижние торцевые поверхности ярем. Боковые же поверхности ярем обычно бывают закрыты конструктивными деталями, прессующими ярмо, т. е. массивными стальными листами или балками, изолированными от ярма. Поэтому нельзя считать, что эти поверхности ярма принимают одинаковое участие в отводе тепла от ярма. Еще более сложны условия закрытия поверхностей сердечников. У последних часть торцевых поверхностей, т. е. тех поверхностей, которые образуются ребрами листов стали, тоже закрыта изоляционными деталями, дистанцирующими обмотки от сердечников. Масло же должно подниматься снизу доверху в канале между стержнем и обмоткой, не имея возможности обмениваться с остальной массой масла.

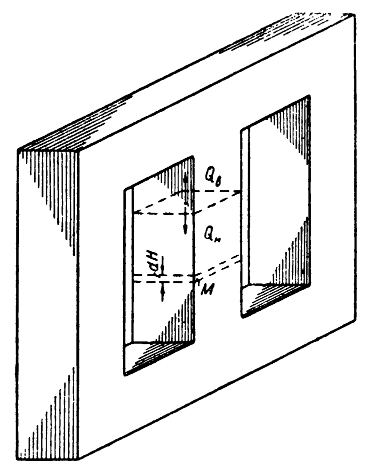
На основании этих соображений легко видеть, что при измерениях температур на поверхности остова должны и действительно замеряются весьма разнообразные значения температур в зависимости от того, в каком месте остова производятся эти измерения. Поэтому вводить какие-либо средние значения удельных тепловых нагрузок было бы несколько необоснованно.

То обстоятельство, что между каждыми двумя листами стали имеется изоляция (бумага или пленка лака), делает поверхности ярма неравномерными с точки зрения отвода тепла. Торцевые поверхности будут больше отводить тепла, тогда как к другим поверхностям ярма тепло может дойти, лишь преодолев большое тепловое сопротивление изоляции листов стали.

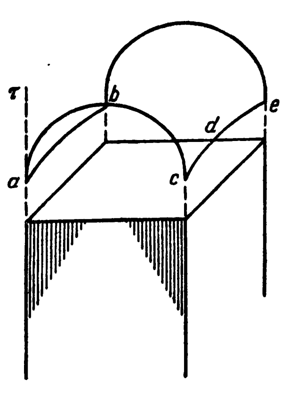
Совокупность этих условий заставляет вести расчет нагрева остова несколько иным путем, а именно, пользуясь опытными данными для наиболее горячей зоны остова. Эта зона наибольшей температуры остова находится, как показывают опыты, примерно на 80% высоты среднего стержня. Понятие средняя температура остова, очевидно, будет весьма неопре-

деленным понятием, а числовые значения соответствующие этому понятию, весьма трудно поддаются расчету и поверочным испытаниям.

Но и расчет температур наиболее горячей зоны остова возможен тоже при введении ряда упрощающих допущений. На самом деле, допустим для простоты, что сечение сердечника имеет прямоугольную (квадратную) форму. В наиболее горячей зоне (пунктир на фиг. 5-36) будут наибольшие температуры. Следовательно, приходится считаться с тем, что тепло потерь будет передаваться не только в горизонтальном направ-



Фиг. 5-36. Трехфазный остов, наиболее горячая зона.

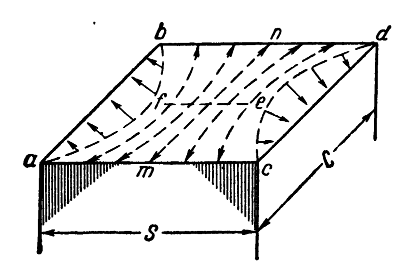


Фиг. 5-37. Примерное распределение температур на поверхности стального сердечника.

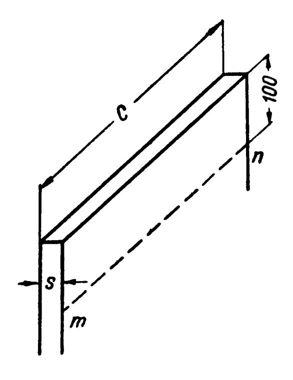
лении, но и в вертикальном направлении, вдоль стальных листов остова. Эта передача тепла вдоль сердечника выше наиболее горячей зоны будет направлена вверх, а ниже наиболее горячей зоны — будет направлена вниз. Если в любом месте по высоте стержня, например, в точке M (фиг. 5-36) мы выделим мысленно некоторую зону высотою dH, то, ввиду существования передачи тепла вдоль сердечника, нельзя будет утверждать, что количество тепла, отданное с боковой поверхности этой зоны, высотою dH, равно количеству тепла, генерированному потерями в этой зоне dH. Она получит некоторую долю тепла от вышележащей более горячей зоны и сама отдает часть своего тепла нижележащей зоне. Ввиду различного значения температуры окружающей среды, масла, у поверхности сердечника вдоль его высоты, математическая формулировка задачи по расчету температуры такого сердечника сильно усложняется. Поэтому для простоты предполагают, что в наиболее нагретой зоне все тепло, выделенное в этой зоне,

отдается поверхностью этой зоны, т. е. что для наиболее горячей зоны $Q_в$ и $Q_н$ количества тепла отданное вверх и отданное вниз, равны нулю.

Измерения температур на поверхности остова показывают, что на торцевых поверхностях, образованных ребрами листов стали, будет наибольшая температура, т. е. в основном теплопередача внутри остова идет вдоль листов стали. Схематически это распределение температур показано на фиг. 5-37, — кривая *abc* дает распределение температур на торцевой поверхности, а кривая *cde* — на плоской части листов стали. Так как превышение температуры на поверхности тела определяет количество отдаваемого с этой поверхности тепла, то кривые фиг. 5-37 показывают, что теплоотдача в основном происходит с торцевых поверхностей.



Фиг. 5-38. Схема распределения потоков тепла по сечению квадратного стержня.



Фиг. 5-39. К расчету тепловой нагрузки листа стали.

Распределение температур на поверхности, показанное на фиг. 5-37, приводит к такой вероятной картине распределения направлений тепловых потоков по сечению сердечника, которое показано на фиг. 5-38. Здесь пунктирные линии *afb* и *ced* являются линиями раздела направления тепловых потоков, показанных стрелками. Линия *fe* является наиболее горячей зоной в сечении сердечника.

Выделяя линию *mn* теплового потока по среднему листу сердечника, предположим, что для этой линии не будет ответвлений теплового потока ни вправо, ни влево, точно так же, как мы предположили, что в наиболее нагретой зоне по высоте стержня нет передачи тепла ни вверх, ни вниз вдоль стержня. Тогда легко оценить предельные размеры C среднего листа стали (фиг. 5-39).

Для зоны высотою 100 *мм* потери в среднем листе $P_{ст}$ будут равны

$$P_{ст} = k_{ст} \cdot 7.55 C \cdot s \cdot 10^{-4}.$$

Для индукции $B = 14\,500$ *гс* удельные потери $k_{cm} = 3{,}13$ *вт/кг* при $s = 0{,}35$ *мм*, т. е в этом случае

$$P_{cm} = 3{,}13 \cdot 7{,}55 \cdot 0{,}35\, C \cdot 10^{-4} = 7{,}84\, C \cdot 10^{-4} \text{ вт},$$

охлаждающая поверхность F двух торцов этого листа равна

$$F = 2 \frac{s}{0{,}85} \cdot 10^{-4} = 2{,}353 \cdot s \cdot 10^{-4} = 0{,}825 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

где коэффициент 0,85 учитывает толщину изоляции листа. Следовательно, удельная тепловая нагрузка q_f равна

$$q_{cm} = \frac{P_{cm}}{F} = \frac{7{,}84 \cdot C}{0{,}825} = 9{,}5 \cdot C \text{ вт/м}^2.$$

Зависимость превышения температуры поверхности стержня от его удельной тепловой нагрузки примем такую же, как и для внутренних цилиндрических катушек (см. приложение XI, лист 1), т. е. согласно табл. 5-2.

Таблица 5-2

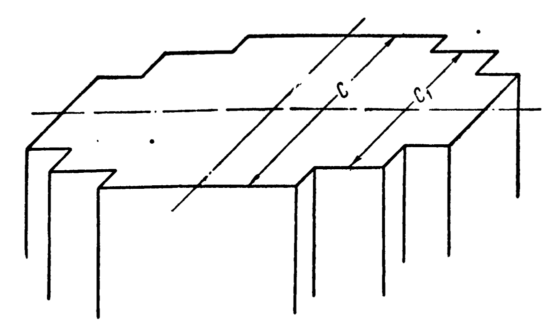
Удельная тепловая нагрузка в *вт/м²*	1 000	1 500	2 000	2 500
Превышение температуры поверхности над средней температурой масла в °С	22	28	33	35

Можно считать, что поверхность стержня может иметь превышение температуры порядка 28—30° С, т. е. удельная тепловая нагрузка будет порядка 1 600 *вт/м²*. В этом случае ширина листа C не должна быть больше

$$C = \frac{1\,600}{9{,}5} = 170 \text{ мм}.$$

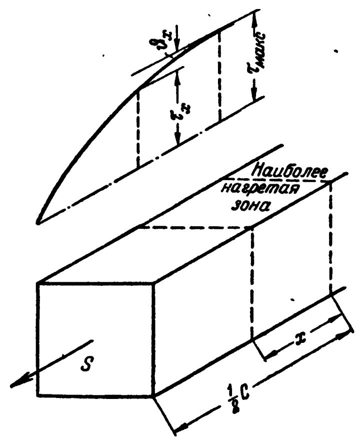
Данный расчет сделан, исходя из слишком жестких условий. Помимо предыдущих ограничений относительно невозможности ответвления теплового потока вверх и вниз или в стороны для наиболее нагретого листа, следует еще обратить внимание на то, что сердечники имеют ступенчатую форму сечения фиг. 5-40. Пакет с листом шириною C_1 будет иметь согласно этому расчету более низкое превышение температуры поверхности и также своей наиболее горячей зоны, по крайней мере в отношении $\frac{C_1}{C}$. В силу этого улучшится отвод тепла от пакета C.

Хотя известно общее математическое решение задачи о нахождении температуры в каждой точке многоступенчатого сечения сердечника, обладающего различной теплопроводностью вдоль и поперек листов стали, при различных температурах масла у разных граней сердечника, все же из-за большой сложности этих формул приходится руководствоваться опытными данными.



Фиг. 5-40. Ступенчатое сечение сердечника.

Обычно делают сплошные многоступенчатые сердечники до размеров C наибольшего листа порядка 250—300 *мм*. После этого в сечении стержня и ярма делают охлаждающие каналы, разбивая сечение сердечника на отдельные части толщиной 150—170 *мм*.



Фиг. 5-41. Изменение температуры вдоль бруска.

Перепад температуры от середины сечения пакета до его торцевой поверхности обычно бывает невелик. Если его считать с теми же ограничениями, которые были сделаны для расчета превышения температуры на торцевой поверхности наиболее нагретого листа, то можно пользоваться формулой для перепада температуры τ_x в теле, в единице объема которого (в 1 $см^3$) генерируется w_j *вт*. Предполагается, что эти потери отводятся лишь с одной боковой поверхности тела. Выделим в этом теле мысленно брус (фиг. 5-41), тепло от которого отдается в окружающее пространство только с поверхности S. Тогда на расстоянии x *см* от наиболее нагретой зоны будет τ_x превышение температуры над температурой поверхности. Это превышение определяется по формуле

$$\tau_x = \tau_{макс} - \frac{w_{ст}}{2\lambda} x^2 = \tau_{макс} - \vartheta_x, \qquad (5\text{-}35)$$

где λ — теплопроводность в $вт/см°\,C$, а $w_{ст}$ — потери в единице объема в $вт/см^3$. Для получения $\vartheta_{макс} = \tau_{макс}$ подставим вместо x в *см* половину ширины пакета C; выразив C

в *мм*, а $w_{ст}$ выразим через $k_{сп}$ — удельные потери в 1 *кг* стали. Между $w_{ст}$ и $k_{ст}$, очевидно, будет зависимость

$$w_{ст}=\frac{k_{ст}}{132}. \qquad (5\text{-}36)$$

Тогда, считая для легированной стали $\lambda=0{,}4$ *вт/см°С*, получим

$$\tau_{макс}=24k_{ст}C^2\cdot 10^{-6}. \qquad (5\text{-}37)$$

При $C=200$ *мм*, $k_{ст}=3{,}13$ *вт/кг* при индукции 14 500 *гс* получим

$$\tau_{макс}=24\cdot 3{,}13\cdot 4\cdot 10^{-2}=3°\ С.$$

Так же, как и для расчета превышения температур на поверхности, все предыдущие допущения относительно передачи всего тепла только вдоль листа стали приводят и здесь к несколько завышенным значениям превышения температуры наиболее горячей точки над температурой поверхности. Измерения показывают, что эти превышения уменьшаются до 0,6—0,7 от значений, рассчитанных по формуле (5-37). Для пакета стали квадратной формы поправочный коэффициент, который надо внести в формулу (5-27) из-за отвода тепла поперек изоляции листов стали, равен примерно 0,85—0,9.

В последнее время вновь получают большое распространение сухие трансформаторы на большие мощности. Условия расчета нагрева обмоток и остова сухих трансформаторов весьма сильно осложняются тем, что у этих трансформаторов особенно сильно сказывается передача тепла от одних частей трансформатора другим его частям. Так, например, большие температуры на поверхности остова могут существенно изменить температуру близлежащей обмотки. У масляных трансформаторов, как показывает опыт, небольшой масляный канал позволяет уже совершенно обособленно рассчитывать превышения температур обмоток и остова.

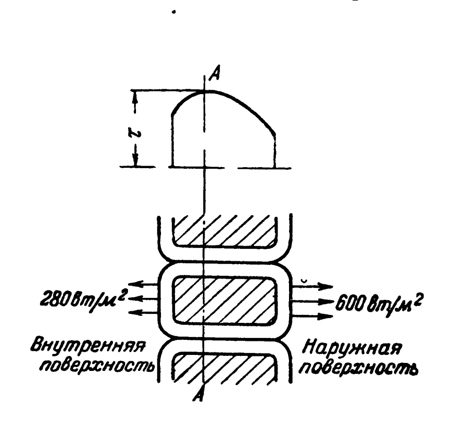
Для обмоток сухих трансформаторов существенное значение имеет отдача тепла лучеиспусканием. Так, если отдача тепла происходит с наружной поверхности цилиндрической катушки, то превышению средней температуры катушки, равному 60° С, над температурой окружающего воздуха соответствует удельная тепловая нагрузка 600 *вт/м²*. Внутренние поверхности цилиндрических катушек отдают тепло лишь при помощи конвекции и только лишь небольшая доля тепла отдается лучеиспусканием. Поэтому тому же среднему превышению температуры 60° С соответствует удельная тепловая нагрузка 280 *вт/м²*. При этом имеется в виду, что доступ

охлаждающего воздуха к наружной поверхности значительно лучше, чем для внутренней поверхности.

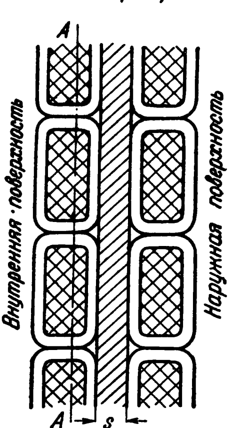
Если цилиндрическая катушка может отдавать тепло своей наружной и внутренней поверхностями, то расчет среднего превышения уже осложняется. Если эта катушка намотана только из одного слоя провода прямоугольного сечения, то можно считать в первом приближении, что допустима средняя для обеих поверхностей удельная тепловая нагрузка

$$\frac{600+280}{2}=440\ вт/м^2.$$

Как показано на фиг. 5-42, в действительности в этом случае наружная и внутренняя поверхности будут иметь различные удельные тепловые нагрузки, но не расчетное значение 440 $вт/м^2$. Внешняя поверхность отдаст 600 $вт/м^2$, а внутренняя лишь 280 $вт/м^2$. Это произойдет за счет простого перемещения наиболее горячей зоны (линия AA на фиг. 5-42) ближе к внутренней поверхности катушки. Такое перемещение вполне возможно, так как теплопроводность меди весьма велика и внутренний перепад температуры ничтожно мал. Поэтому на фиг. 5-42 пришлось внутренние (по толщине провода) и внешние (у поверхности) перепады температур изобразить не в масштабе.



Фиг. 5-42. Схема температур и теплоотдачи однослойной цилиндрической катушки.



Фиг. 5-43. Разрез двухслойной цилиндрической катушки. AA—положение наиболее горячей зоны.

Легко убедиться в том, что подобное же перераспределение тепловых потоков будет и в двухслойной катушке. На самом деле если между слоями проложен слой изоляции толщиной $s=0{,}5$ *мм* (фиг. 5-43), то тепловой поток при переходе из одного слоя в другой должен будет преодолеть сопротивление

изоляции проводов и междуслойной изляции, имеющей в общей сложности 1 *мм* толщины. Допустим, что плотность этого потока, как и в первом случае, равна

$$600 - 440 = 160 \text{ вт/м}^2 = 0{,}0160 \text{ вт/см}^2.$$

Тогда перепад температуры на этом слое изоляции будет равен

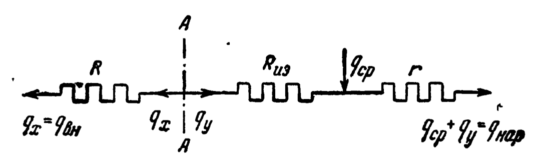
$$\vartheta = \frac{q}{\lambda} s, \tag{5-38}$$

где ϑ — перепад температуры в °С;
q — плотность теплового потока в *вт/см* °С;
s — толщина изоляции в *см*.

В данном случае получим, считая, что $\lambda = 0{,}0016$ *вт/см* °С

$$\vartheta = \frac{0{,}0160}{0{,}00160} \cdot 0{,}1 = 1 °\text{С}.$$

Этот перепад температуры на изоляции не может существенно повлиять на уменьшение перепада температуры у поверхности. Поэтому и в этом случае можно считать, что наружная поверхность будет отдавать несколько меньше 600 *вт/м*², а внутренняя немного больше 280 *вт/м*².



Фиг. 5-44. Схема эквивалентных сопротивлений.

Если даже допустить, что тепловое сопротивление междуслойной изоляции возрастет раз в 10, то легко показать, что среднее превышение температуры катушки весьма мало будет отличаться от 60° С. Этот расчет удобнее всего производить, как расчет токов в сети, где заданы сопротивления и наибольшее напряжение. Можно считать что перепад у наружной поверхности соответствует некоторому условному сопротивлению

$$r = \frac{60 \text{ °С}}{600 \text{ вт/м}^2} = 0{,}1 \text{ усл. ед.},$$

а тепловое сопротивление у внутреннего слоя R и на междуслойной изоляции $R_{из}$ равно

$$R = \frac{60}{280} = 0{,}214 \text{ усл. ед.}; \quad R_{из} = \frac{1}{160} = 0{,}00625 \text{ усл. ед.}$$

Пренебрегая падением напряжения в меди провода, можно составить электрическую схему (фиг. 5-44), соответствую-

щую данному случаю распределения тепловых потоков. Линия AA соответствует наиболее горячей точке. Поэтому

$$q_x R = (q_{cp} + q_y) r + q_y R_{из}$$

и

$$q_{cp} = q_x + q_y.$$

Распределение потоков получается тогда равным

$$\frac{q_x}{q_{cp}} = \frac{2r + R_{из}}{r + R + R_{из}}.$$

Допустим, что $R_{из}$ в 10 раз больше, чем это было рассчитано для одного слоя электротехнического картона, т. е. $R_{из} = 0{,}0625$. Тогда

$$\frac{q_x}{q_{cp}} = \frac{0{,}2 + 0{,}0625}{0{,}1 + 0{,}214 + 0{,}0625} = 0{,}70,$$

т. е.

$$q_x = 0{,}7 \cdot 440 = 310 \ вт/м^2.$$

Наружный слой будет отдавать 880—310 = 570 $вт/м^2$. Так как для внутренней поверхности отношение удельных тепловых нагрузок равно

$$\frac{310}{280} = 1{,}11 \approx 1{,}1,$$

то по таблице приложения XI (лист 2а) найдем, что превышение температуры увеличивается в 1,08 раза, т. е. будет равно 65° С. С другой стороны, для наружной обмотки найдем, что отношение тепловых нагрузок равно

$$\frac{1}{\frac{600}{570}} = \frac{1}{1{,}05},$$

а потому по той же таблице найдем, что превышение температуры наружного слоя будет равно

$$0{,}96 \cdot 60 = 57{,}5° \ С.$$

Среднее же, определяемое путем измерения сопротивления обоих слоев, превышение температуры равно

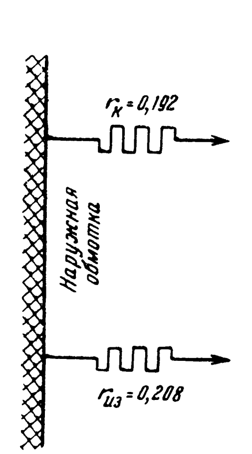
$$\tfrac{1}{2}(65 + 57{,}5) = 61° \ С.$$

Таким образом, видно, что при очень неблагоприятных условиях передачи тепла от внутреннего слоя наружному среднее превышение температуры изменяется весьма слабо, а внутренний слой имеет довольно существенное превышение температуры.

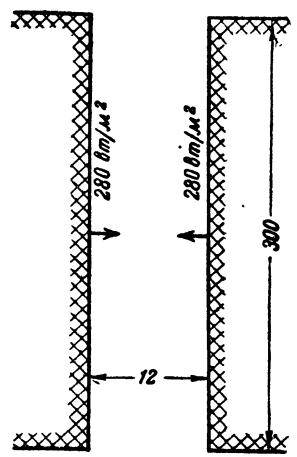
Эти вычисления были проведены, исходя из предположения, что на данную катушку не влияют другие катушки или стальной сердечник, находящиеся внутри данной катушки. Теоретически учесть это влияние весьма трудно. Поэтому прихо-

дится пользоваться лишь опытными данными или упрощенными приближенными способами расчета, пригодность которых ограничена очень узкими рамками температур.

В качестве одного из таких приближенных методов расчета можно рекомендовать метод расчета, основанный на аналогии тепловых и электрических полей или вернее тепловое поле, благодаря ряду упрощающих допущений приводится к виду эквивалентной электрической цепи.



Фиг. 5-45. Схема теплоотдачи наружной поверхности.



Фиг. 5-46. Размер опытного масляного канала.

Так, условия теплоотдачи наружной обмотки, для которой, как это было указано выше, удельной тепловой нагрузке 600 *вт/м²* соответствует среднее превышение температуры 60° С, можно охарактеризовать некоторым тепловым сопротивлением R, равным

$$R = \frac{60}{600} = 0{,}1 \text{ усл. ед.}$$

Если теплоотдачу наружной катушки подразделить на лучеиспускание и на конвекцию, то можно было бы условное тепловое сопротивление конвекции $r_к$ и лучеиспускания $r_щ$ при заданных превышениях температуры обмоток и заданной температуры окружающей среды 35° С считать равными

$$r_к = 0{,}192 \text{ усл. ед.},$$

$$r_{из} = 0{,}208 \text{ усл. ед.}$$

Таким образом, для наружной обмотки получается эквивалентная электрическая схема, показанная на фиг. 5-45.

Здесь

$$R = \frac{r_к\, r_{из}}{r_к + r_{из}}$$

как для двух параллельно соединенных сопротивлений в электрической цепи.

Для внутренней поверхности катушки приходится считаться только с конвекцией, так как цифра 280 *вт/м²* при среднем превышении температуры обмоток была получена таким образом, что с обеих сторон канала шириной 12 *мм* и высотой 300 *мм* находились две одинаково нагруженных поверхности при одинаковой температуре (фиг. 5-46). Можно было бы считать, что условное тепловое сопротивление такого устройства равно

$$\frac{60}{280} = 0{,}214 \text{ усл. ед.}$$

Фиг. 5-47. Эквивалентная схема теплопередачи масляного канала.

Но более правильно эту цифру подразделить на две составляющих по следующей схеме. Все тепловое сопротивление при конвекции в основном сосредоточено вблизи поверхности. Для него можно принять значение выше найденного сопротивления $r_к = 0{,}192$. Но кроме этого имеется еще сопротивление движению воздуха в канале. По аналогии с гидродинамическими условиями будем считать, что в основном все термическое сопротивление сосредоточено у входа и выхода воздуха из канала. Тогда можно для конвекции в канале составить эквивалентную электрическую схему, показанную на фиг. 5-47. Здесь $r_в$ — есть суммарное сопротивление у выхода из канала, которое должны преодолеть оба тепловых потока—с одной и другой поверхности. Поэтому должно быть

$$2r_в + 0{,}192 = 0{,}214 \text{ усл. ед.},$$

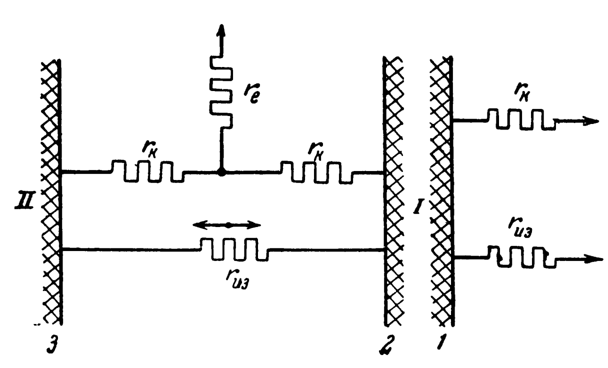
откуда

$$r_в = 0{,}011.$$

Обычно температуры обмоток мало изменяются или вернее всегда доводят эти температуры до заданных уровней, стремясь наилучшим образом использовать активные материалы. Поэтому найденные условные сопротивления можно считать постоянными в узких рамках температур, а следовательно, и тепловых нагрузок. В том случае, если поверхности канала могут иметь разные температуры, в электрической схеме по фиг. 5-47 следовало бы добавить еще одно сопротивление $r_{из}$ между обеими поверхностями обмоток.

В качестве примера возьмем систему обмоток, состоящую из наружной обмотки I (фиг. 5-48) и внутренней обмотки II. Наружная обмотка имеет две теплоотдающих поверхности. Средняя удельная тепловая нагрузка этой обмотки q_I, т. е. обе поверхности отдают $2q_I$ *вт/м²*. Внутренняя обмотка, допустим, столь хорошо изолирована, что вся теплоотдача происходит лишь с внешней поверхности (индекс 3 на фиг. 5-48) внутренней обмотки и удельная тепловая нагрузка имеет значение q_{II}. Обозначим через q с соответствующими индексами количество тепла, отдаваемого с 1 *м²* поверхности, т. е. через

$q_{1к}$ — путем конвекции с наружной поверхности катушки I;
$q_{1и}$ — путем лучеиспускания с наружной поверхности катушки I;
$q_{2к}$ — путем конвекции с внутренней поверхности катушки I:
$q_{2и}$ — путем лучеиспускания с внутренней поверхности катушки I;
$q_{3к}$ — путем конвекции с наружной поверхности катушки II;
$q_{3и}$ — путем лучеиспускания с наружной поверхности катушки II.



Фиг. 5-48. Эквивалентная схема теплоотдачи наружного и внутреннего слоев.

Очевидно $q_{2и} = -q_{3и}$ и, следовательно, мы имеем 5 неизвестных, для которых можем составить 5 уравнений:

$$q_{1к}\, r_к = q_{1и}\, r_и\,,$$

$$(q_{3к} + q_{2к})r_в + q_{2к}\, r_к = q_{1к}\, r_к\,,$$

$$(q_{3к} + q_{2к})r_в + q_{3к}\, r_к - q_{1к}\, r_к = q_{3и}\, r_и\,,$$

$$q_{3к} + q_{3и} = q_{II},$$

$$q_{2к} + q_{1к} + q_{1и} = 2q_I + q_{3и}\,,$$

где q_I и q_{II} являются заданными величинами.

Полагая для упрощения $r_{1к} = r_{1и}$ и подставляя найденные значения для условных тепловых сопротивлений, получим следующее решение:

$$q_{1к} = q_{1и} = 0{,}592\, q_I + 0{,}16\, q_{II}\,,$$

$$q_{2к} = 0{,}544\, q_I + 0{,}12\, q_{II},$$

$$q_{3к} = 0{,}56 q_{II} + 0{,}272\, q_I\,,$$

$$q_{3и} = 0{,}44 q_{II} - 0{,}272\, q_I\,.$$

Таким образом, может быть ориентировочно оценено влияние одной обмотки на другую. В данном случае при составлении уравнений было предположено, что теплоотдача путем лучеиспускания идет от поверхности *3* к поверхности *2* и потому все удельные тепловые нагрузки катушки *I*—т. е. $q_{1к}$, $q_{1и}$, $q_{2к}$ содержат член q_{II} с некоторым коэффициентом. Несколько необычным кажется наличие члена $0{,}272\, q_I$ в формуле для $q_{3к}$. Однако, если значение $q_{3и}$ мы примем, как количество переданного благодаря взаимному влиянию одной катушки на другую и обозначим через $q_{вв}$, то эти формулы примут более рациональный вид

$$q_{1к} = 0{,}691 q_I + 0{,}364\, q_{вв}\,, \qquad q_{2и} = -q_{вв}\,,$$

$$q_{1и} = 0{,}691 q_I + 0{,}364 q_{вв}, \qquad q_{3к} = q_{II} - q_{вв},$$

$$q_{2к} = 0{,}618 q_I + 0{,}272 q_{вв}\,, \qquad q_{3и} = q_{вв} = 0{,}44 q_{II} - 0{,}272\, q_I\,,$$

т. е. каждая удельная тепловая нагрузка для катушки *I* содержит с тем или иным коэффициентом член, зависящий от взаимной передачи тепла между катушками. Последняя зависит от значений средних тепловых нагрузок каждой катушки.

Недостатком этого способа является то, что недостаточно четко учитываются возможности взаимной передачи тепла путем конвекции. Можно предполагать, что, начиная с некоторого значения разности температур катушек *II* и *I*, будет иметь место взаимная передача тепла не только путем лучеиспускания, но и путем конвекции. Учет этого эффекта привел бы к более громоздким формулам.

В некоторых случаях приходится применять дисковые обмотки. В этом случае для вертикального расположения сердечников, т. е. при горизонтальном расположении дисков катушек, можно считать допустимой удельную тепловую нагрузку 280 *вт/м*² при среднем превышении температуры обмоток 60° С и ширине канала 10 *мм* и 380 *вт/м*² при воздушном канале 18—20 *мм*.

Конструктивные формы исполнения мелких (от 0,5 *ква* и ниже) сухих трансформаторов чрезвычайно разнообразно. Большое распространение получили трансформаторы броневого типа. В этом случае отводу тепла способствует сталь остова трансформатора, которая от собственных потерь нагревается обычно меньше, чем обмотка. С другой стороны, в этих малых катушках не делается никаких каналов и обмотки изолируются друг от друга электрокартоном или несколькими слоями кабельной бумаги. Часто также катушки мотаются на каркасы из пластмассы или электрокартона. Все это усложняет условия отвода тепла от обмоток. Поэтому здесь получается довольно сложная картина распределения тепловых потоков. Поэтому при расчете обычно ориентируются предварительно на некоторые средние значения плотностей тока 1,5—2 *а/мм*² для внутренних обмоток и 2—2,5 *а/мм*² для наружных обмоток. Так как обычно не представляет большого труда быстро изготовить и испытать на нагрев опытную модель, то окончательный выбор размеров проводов и стального остова делается после испытания на нагрев опытной модели.

По поводу тепловых испытаний трансформаторов и определения температур катушек можно сделать следующее замечание. Для расчета нагрева (или охлаждения) обмоток трансформаторов и электрических машин принимается вопреки общим теоретическим указаниям упрощенная формула: для нагрева

$$\tau = \tau_{макс}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right); \tag{5-39}$$

для охлаждения

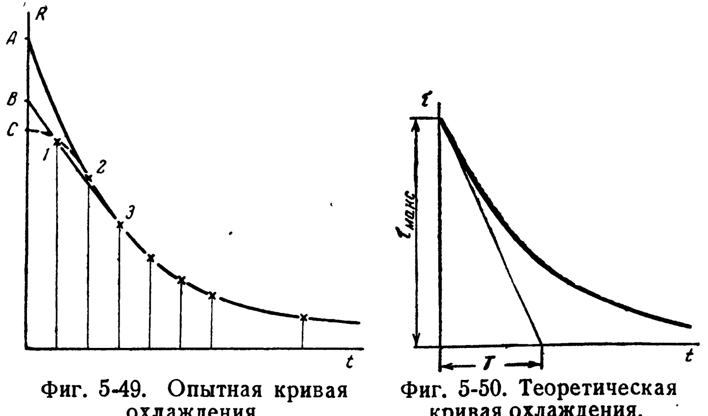
$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}, \tag{5-40}$$

где $\tau_{макс}$ или τ_0 — конечное или начальное превышение температуры;
t — время (в час. или мин.);
T — постоянная времени (то же в час. или мин.).

$$T = \frac{\Sigma(cG)}{kF}, \qquad (5\text{-}41)$$

где $\Sigma(cG)$ — суммарная теплоемкость, т. е. сумма произведений коэффициентов теплоемкостей (в *вт/сек* или в *втч/кг*°С) на вес данного материала в *кг*;
k — коэффициент теплоотдачи в *вт/м*^{2} °С;
F — поверхность теплоотдачи в *м*^{2}.

Формулы (5-39) и (5-40) применимы лишь в том случае, если все точки тела одновременно с одинаковой скоростью изменяют свою температуру, чего в действительности никогда не бывает. В свое время на это обстоятельство обратил вни-



Фиг. 5-49. Опытная кривая охлаждения.

Фиг. 5-50. Теоретическая кривая охлаждения.

мание проф. Р. Л. Аронов [Л. 48]. Здесь необходимо указать лишь, что эти обстоятельства постоянно наблюдаются при тепловых испытаниях. Так, после снятия нагрузки замер активных сопротивлений обмоток постоянным током в ближайшие моменты времени (20, 40 и 60 сек.) после отключения дает ряд точек, которые примерно располагаются так, как показано на фиг. 5-49 (точки *1*, *2* и *3*). Здесь по оси абсцисс взят нормальный десятичный масштаб, хотя часто рекомендуются логарифмические масштабы. Последние же при тех размерах бумаги, на которой строятся кривые, оказываются гораздо более грубыми, чем правильно выбранные десятичные масштабы, и потому сглаживают неровности кривой, скрывая физический смысл кривой.

Получив первые три точки омического сопротивления, начинают искусственно подгонять результаты под теоретическую кривую, соответствующую уравнению формулы (5-40) см. фиг. 5-50. Так как все же через все первые три точки не удается провести желаемой формы кривую, то начинаются разные толкования в части достоверности измерений, всякого рода отклонения в приборах и неточностей отсчетов. Если провести кривую через точки *2* и *3* (фиг. 5-49), то начальная точка *А* даст слишком высокую температуру. Поэтому обычно берут под сомнение точку *2* и кривую проводят через точки *1* и *3*, получая в качестве начального значения сопротивления точку *В*. По существу же физического процесса охлаждения неравномерно нагретого тела кривая охлаждения, т. е. понижения средней температуры тела никогда не может иметь формы, показанной на фиг. 5-50, а более вероятна форма, показанная пунктиром на фиг. 5-49, как раз через все три точки *1*, *2*, *3*.

Вопросы неустановившихся тепловых процессов в катушках требуют, однако, дальнейшего более детального изучения.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

6-1. ВВЕДЕНИЕ

В первой части этой книги разбирались вопросы теоретического расчета трансформатора в зависимости от того, какие значения технических данных были заранее предписаны. Там же было приведено несколько примеров теоретических расчетов (см. § 1-3 и § 1-4).

В данной главе даются примеры практических расчетов трансформаторов разной мощности, т. е. в расчете указываются особенности конструкции основных узлов трансформатора, делаются все указания относительно типа обмоток, типов катушек, чисел витков в них, взаимного расположения катушек и, кроме того, подсчитывается ряд технических данных, которые при теоретическом расчете либо подсчитывались в общих чертах, либо вовсе не подсчитывались.

При переходе от теоретических расчетов к практическим расчетам прежде всего возникает вопрос, насколько размеры трансформатора, найденные при помощи теоретических способов расчета, могут быть использованы при практических расчетах.

Для выяснения этого вопроса приведены расчеты трансформаторов 100 и 1 800 *ква*. В этих практических расчетах, достаточно хорошо совпадающих с теоретическими, все же сначала не получались те значения короткого замыкания, которые требуются по стандарту. Поэтому дополнительно даны новые практические расчеты и кратко указаны пути, каким образом надо изменить размеры моделей теоретических расчетов, чтобы получить заданные значения напряжения короткого замыкания. Эти новые расчеты показывают, что новые дополнительные условия в виде заданного значения напряжения короткого замыкания приводят к некоторому отклонению действительных размеров от размеров, соответ-

ствующих теоретическому минимуму стоимости и, следовательно, к удорожанию трансформатора.

Последний пример расчета освещает некоторые детали расчета мощных высоковольтных трансформаторов.

6-2. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА 100 *ква*

Согласно данным теоретического расчета (см. § 1-3) трансформатор мощностью 100 *ква* для класса изоляции 6 000 *в* должен иметь, при заданных стандартных значениях потерь в стали и в медных проводах, следующие размеры:

диаметр стержня	$D = 145$ *мм*,
расстояние между осями стержней	$MO = 253$ *мм*,
высота окна	$H = 375$ *мм*.

Практический расчет этого типа дан в расчетной записке РТ-1.

Для данного диаметра обычно берется сечение стержня с четырьмя или пятью ступенями. Если задаться, что ширина ярма должна быть равна 92% от диаметра стержня (см. § 2-2), то получим $S_k = 0{,}92$, $C_k = 0{,}392$.

Согласно кривым приложения IV (лист 1) получим следующие относительные ширины всех пяти ступеней сечения сердечника: $C_5 = 0{,}395$; $C_4 = 0{,}594$; $C_3 = 0{,}735$; $C_2 = 0{,}862$; $C_1 = 0{,}954$ или в *мм* для $D = 145$ *мм* $C'_5 = 56{,}8$; $C'_4 = 86$; $C'_3 = 106{,}8$; $C'_2 = 125$; $C'_1 = 136{,}5$.

Округляя, получим окончательно следующие ширины листов

$$C_5 = 57;\quad C_4 = 86;\quad C_3 = 106;\quad C_2 = 124;\quad C_1 = 136 \text{ (фиг. 6-1)}.$$

Далее следует произвести вычисления S_n по формуле

$$S_n = \sqrt{D^2 - C_n^2}$$

$D^2 = 21\,025$	21 025	21 025	21 025	21 025
$C_n^2 = 3\,249$	7 396	11 236	15 376	18 496
$S_n^2 = 17\,776$	13 629	9 789	5 649	2 529
$S_n = 133$	117	99	75,2	50,3

или, округляя (фиг. 6-1),

$S_n = 133$	117	99	75	50
117	99	75	50	—
$S_n - S_{n-1}$ 16	18	24	25	50

Здесь $S_n - S_{n-1}$ — толщина пакета в *мм*. На основании этого получается следующий расчет сечения сердечника

$$\left.\begin{aligned} 5{,}7\cdot 1{,}6 &= 9{,}1 \\ 8{,}6\cdot 1{,}8 &= 15{,}5 \\ 10{,}6\cdot 2{,}4 &= 25{,}4 \end{aligned}\right\}\ 50{,}0\ \text{см}^2$$

$$\left.\begin{aligned} 12{,}4\cdot 2{,}5 &= 31{,}0 \\ 13{,}6\cdot 5\ \ &= 68{,}0 \end{aligned}\right\}\ 99{,}0\ \text{см}^2$$

$$\overline{13{,}3}\quad \overline{149{,}0}\ \text{см}^2\cdot 0{,}85 = 127\ \text{см}^2.$$

Здесь 0,85 коэффициент заполнения для оклеенной стали толщиной 0,35 *мм*. Частичные суммы сечений нескольких пакетов понадобятся в дальнейшем при подсчете веса ярма.

Как показано на фиг. 6-2, ярмо имеет ступенчатую форму и сечение его равно

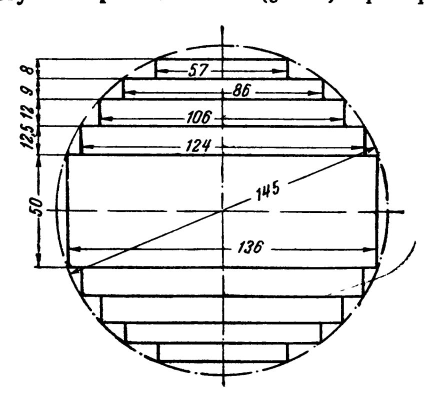
$$
\begin{aligned}
&(1,6+1,8+2,4)10,6 = 93\\
&(2,5+5,0)12,4 \qquad = 61,5\\
&\qquad\qquad\qquad\quad \overline{154,5}\cdot 0,85 = 131\ см^2.
\end{aligned}
$$

В углах ярма площадке в 50 $см^2$ соответствует высота ярма 106 *мм*, а площадке 99 $см^2$ — высота ярма 124 *мм*. Поэтому вес четырех углов ярма равен

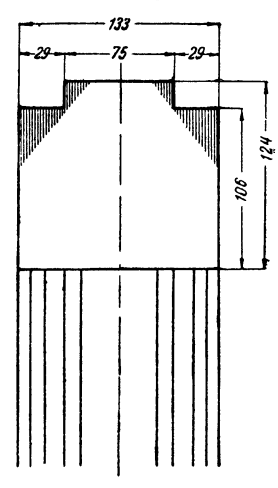
$$
\begin{aligned}
&2\cdot 0,50\cdot 0,85\cdot 7,55\cdot 10,6 = 6,8\\
&2\cdot 0,99\cdot 0,85\cdot 7,55\cdot 12,4 = 15,8\\
&\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\ \ \overline{22,6}\ кг
\end{aligned}
$$

В расчетной записке помещены только итоговые результаты.

В учебных расчетах рекомендуется несколько иной порядок вычислений. После того как путем теоретического расчета или приближенным способом найдены основные размеры остова трансформатора D, H и MO, то лучше всего прямо переходить к размещению обмоток. Для этого сечение стержня и ярма можно лишь приближенно оценить, пользуясь приведенными (§ 2-5) примерами



Фиг. 6-1. Сечение стержня для ⌀ 145 *мм*.



Фиг. 6-2. Сечение ярма для ⌀ 145 *мм*.

расчетов, после чего по заданной индукции определяются числа витков в обмотках. Детализация же сечения стержня и ярма переносится на самый конец расчета, когда для обмоток получились уже вполне приемлемые данные. Такой порядок расчета объясняется тем, что приближенная оценка полезного сечения сердечника для любого диаметра может быть произведена достаточно точно (с точностью 3—4%). Что же касается обмоток, то при подсчете основных технических данных может выявиться необходимость несколько изменить числа витков в обмотках и, следовательно, диаметр стержня D для того, чтобы получить расчет, удовлетворяющий требованиям стандарта.

Руководствуясь данными теоретического расчета для вторичной обмотки на 230 *в*, соединяемой в звезду, выбираем 34 витка, что дает для величины U_n *в* на виток, значение, равное

$$U_n = \frac{230}{\sqrt{3}\cdot 34} = 3,90.$$

Тогда индукции в сердечнике и в ярме будут равны

$$B_{яр}=\frac{3,90\cdot 10^8}{222\cdot 127}=13\,850 \text{ гс},$$

$$B_{яр}=13\,850\frac{127}{131}=13\,450 \text{ гс},$$

что достаточно близко подходит к данным теоретического расчета.

Как было указано ранее (§ 3-3), обмотки низшего напряжения (сокращенно НН) для трансформаторов мощностью до 180 ÷ 320 *ква* делаются цилиндрического типа. Для определения размеров проводов следует прежде всего, пользуясь указаниями главы 3, выбрать изоляционные расстояния от ярма, в данном случае около 10—20 *мм*. Тогда, вычитая эти удвоенные размеры из высоты окна $H=375$ *мм*, получим, что осевой размер обмотки НН должен быть порядка 355—335 *мм*.

Цилиндрические катушки почти всегда делаются двухслойными (см. главу 3). Поэтому в данном случае в слое должно быть 17 витков, которые должны быть плотно размещены на указанной выше высоте 355—335 *мм*. Отсюда легко найти осевой размер витка

$$\frac{355 \text{ или } 335}{17+1}=19{,}7 \text{ или } 18{,}6 \text{ мм},$$

т. е. виток должен будет состоять из двух параллельных проводов, ибо не рекомендуется применять прямоугольные провода с размером более, чем 12,5 *мм* (см. приложение VI лист 2).

Что же касается радиального размера провода то он находится, исходя из того, что при теоретическом расчете была найдена плотность тока δ, в силу чего видно, что каждый провод должен быть толщиною около 5 *мм*.

После простых прикидок можно окончательно остановиться на следующих точных размерах проводов $8{,}6\times 4{,}4$ и $9{,}3\times 4{,}4$ без изоляции и $9{,}1\times 4{,}9$ и $9{,}8\times 4{,}9$ *мм*² с изоляцией. Намотка производится „плашмя", т. е. эти два провода укладываются друг с другом рядом. Поэтому [см. формулу (3-8)] осевой размер этой катушки, имеющей 17 витков в слое, будет равен $(17+1)(9{,}1+9{,}8)=341$ *мм* или, округляя, ≈ 345 *мм*, т. е. изоляционное расстояние от ярма получается равным 15 *мм*, что вполне допустимо. Тогда высота сердечника $2\cdot 15+345=375$ *мм* соответствует заданному значению.

Радиальный размер получается равным

$$4{,}9+4{,}9+2\cdot 0{,}12=10{,}04\approx 11 \text{ мм},$$

где 0,12 — изоляция между слоями.

Между катушкой НН и сердечником делается канал 3,5 *мм* и поэтому внутренний диаметр катушки равен $145+2\cdot 3{,}5=152$ *мм*, средний диаметр $152+11=163$ *мм*, внешний диаметр 174 *мм*.

Вес медных проводов НН $=83{,}9\cdot 34\cdot 76{,}9\cdot 163\cdot 10^{-6}=35{,}9$ *кг*, [здесь $83{,}9=3\cdot\pi\cdot 8{,}9$ (три фазы$\times\pi\times$удельный вес меди);

34 — число витков;
76,9 — сечение обоих проводов;
163 — средний диаметр.

Плотность тока равна

$$\frac{251}{76{,}9}=3{,}27\frac{a}{мм^2}.$$

Потери [см. формулу (5-5)]

$$2{,}4\cdot 3{,}27^2\cdot 35{,}9\cdot 1{,}02=940 \text{ вт}.$$

Здесь коэффициент 1,02 учитывает ориентировочно добавочные потери. Расчет по формуле (2) приложения IX (лист 1) дал бы

$$\beta = \frac{0,44}{1,03}\sqrt{\frac{8,6+9,3}{9,1+98}} = 0,42,$$

и для двух слоев по кривым приложения IX (лист 4) найдем, что средние добавочные потери в обмотке НН составляют для двух слоев при $\beta = 0,42$ всего лишь около 1,5%.

Способ подсчета поверхности охлаждения был уже разобран ранее (см. § 5-5).

Обмотка высшего напряжения (сокращенно ВН) выполнена в виде слоевой обмотки из медного провода диаметром 1,95 *мм* без изоляции или 2,35 *мм* с изоляцией. Этот размер провода круглого сечения выбран, исходя из найденного при теоретическом расчете значения плотности тока $\delta = 3,29$ *а/мм²*. Вся обмотка ВН состоит из двух слоевых катушек *Г* и *Д*, между которыми устроен охлаждающий канал 6 *мм*,— см. эскиз на листе 3 расчетной записки РТ-1. Катушка *Г* намотана непосредственно на изоляционный цилиндр диаметром 190/195, длиною 355 *мм*. Всего в обмотке ВН должно быть

$$\frac{6\,000}{\sqrt{3}\cdot 3,9} = 890 \text{ витков},$$

здесь 3,9 — число вольт на виток (см. выше расчет обмоток НН).

Для регулировки напряжения на ±5% необходимо, следовательно, приключить или отключить по

$$0,05\cdot 890 \approx 45 \text{ витков},$$

т. е. полное число в обмотке должно быть

$$890 + 45 = 935 \text{ витков}$$

и должны быть сделаны отпайки после 890 и 845 витков.

Для обмотки ВН можно взять изоляционное расстояние от ярма равным 20 *мм* и, следовательно, осевой размер катушек ВН должен быть равен

$$375 - 2\cdot 20 = 335.$$

В катушке *Г* укладывается 2 слоя по 140 витков в слое, т. е. всего 280 витков

$$(140 + 1)\cdot 2,35 = 331 \text{ или, округляя, } 335 \text{ мм}.$$

В катушке *Д* — то же по 140 витков в слое, а число слоев равно 5. Последний пятый слой будет, очевидно, неполным — в нем будет всего лишь 40 витков.

Радиальный размер катушки *Г* получается равным

$$2\cdot 2,35 + 2\cdot 0,12 = 4,94 \approx 5 \text{ мм},$$

а катушки *Д* —

$$5\cdot 2,35 + 4\cdot 2\cdot 0,12 = 12,7 \approx 14 \text{ мм}.$$

Общий радиальный размер всей обмотки ВН

$$5 + 6 + 14 = 25 \text{ мм},$$

ее внутренний диаметр (равный внешнему диаметру изоляционного цилиндра) равен 195 *мм*, средний — диаметр 220 *мм*, внешний диаметр — 245 *мм*.

Вес медных проводов обмотки ВН

$$83{,}9 \cdot 935 \cdot 220 \cdot 2{,}99 \cdot 10^{-6} = 52\ \textit{кг},$$

здесь коэффициент 83,9,—см. подсчет веса медных проводов обмотки НН; 935 — число витков; 220 — средний диаметр; 2,99 — сечение провода в $мм^2$.

Плотность тока на средней ступени напряжения равна

$$\frac{9{,}62}{399} = 3{,}22\ \frac{a}{мм^2}$$

и потому потери в обмотке ВН равны

$$2{,}4 \cdot 3{,}22^2 \cdot 52 \frac{890}{935} = 1235\ \textit{вт},$$

здесь вес медных проводов 52 *кг* умножается на отношение чисел витков 890 и 935, так как расчет ведется для средней ступени, когда первые 45 витков оказываются отключенными.

Подсчет поверхности охлаждения обмотки ВН приведен на листе 3 расчетной записки РТ-1. Общая оценка удельных тепловых нагрузок обмоток НН и ВН показывает, что эти удельные тепловые нагрузки 1 400 и 670 *вт* на 1 $м^2$ охлаждающей поверхности, не превосходят обычных норм. Дальнейший тепловой расчет пока не производился, так как прежде всего необходимо подсчитать значение напряжения короткого замыкания стандартизованное значение которого для данного типа равно 5,5%.

На листе 3 расчетной записки РТ-1 дан эскиз обмоток с действительными радиальными размерами обмоток, на нем внизу поставлены те размеры, которые получатся между медными проводами. Катушки считаются сплошными, т. е. изоляционные прокладки между слоями не учитываются.

Столбец цифр на этом листе дает подсчет приведенной ширины канала рассеяния [см. формулу (2) приложения VIII (лист 1)], т. е. сумма $9{,}5 + 4{,}5 + 13{,}5 = 27{,}5$ — есть сумма радиальных размеров катушек в *мм*, одна треть которой (в *см*) 0,92 поставлена за чертой справа. Под этими суммами слева стоит сумма радиальных размеров катушек и каналов в *см*,

$$2{,}75 + 1{,}1 + 0{,}65 = 4{,}5,$$

а справа та же сумма, но с учетом того, что канал в обмотке ВН шириной 0,65 *см* менее эффективен, чем главный канал, так как на канал внутри обмотки ВН приходится менее $^4/_6$ общей намагничивающей силы (расчет ведется для средней ступени 890 витков). Поэтому действительное расстояние от меди до меди 0,65 *см* умножается на квадрат [см. формулу (3) приложения VIII (лист (1)] отношения $^4/_6$, что дает 0,29.

Общее значение приведенной ширины канала рассеяния равно

$$0{,}92 + 1{,}1 + 0{,}29 = 2{,}31\ \textit{см}.$$

Напряжение рассеяния подсчитано по формуле (1) приложения VIII (лист 1) с коэффициентом Марквардта-Роговского $\beta = 0{,}96$ по формуле (5) приложения VIII (лист 2), здесь 4,5 — сумма радиальных размеров, а 34 *см* — средняя высота обмоток ВН и НН, т. е. то же значение $H_к$, которое подставляется и в формулу (1) приложения VIII (лист 1).

Напряжение рассеяния по этому расчету получилось равным 3,3%, но после несколько предварительной оценки добавочного рассеяния в

7% результирующее напряжение рассеяния оказалось бы равным всего лишь 3,53%. Активное же падение напряжения оказалось равным

$$\frac{1\,235+940}{100\cdot 10}=2{,}24\%,$$

т. е. напряжение короткого замыкания $u_к$, определяемое по формуле

$$u_к=\sqrt{u_a^2+u_p^2}$$

получается равным

$$u_к=\sqrt{2{,}24^2+3{,}53^2}=4{,}18\%,$$

т. е. заведомо ниже нормы, установленной по стандарту.

Поэтому возникает вопрос, каким образом надо изменить размеры этой модели, чтобы получить не только установленные стандартом потери, но также нормированное значение напряжения короткого замыкания.

Легко видеть, что, если задано $u_к=5{,}5\%$ и $u_a=2{,}4\%$, то необходимо получить

$$u'_p=\sqrt{u_к^2-u_a^2}=4{,}95\%.$$

и, скидывая еще процентов 5 на добавочное рассеяние, видно, что основное значение напряжения рассеяния должно быть порядка 4,9 ÷ 4,95% тогда как по РТ-1 (лист 3) оно получилось равным 3,3%.

Существует несколько возможностей изменить напряжение рассеяния ибо, как это видно из формулы (1) приложения VIII (лист 1), напряжение рассеяния зависит от нескольких величин: от числа витков, от приведенной ширины канала потока рассеяния, от высоты обмотки, от среднего диаметра обмотки. Последняя величина играет незначительную роль, тем более, что средний диаметр по каналу рассеяния тесно связан со всей конструкцией трансформатора. Приведенная ширина канала рассеяния тоже не может быть значительно изменена. Уменьшению этой ширины канала обычно препятствуют соображения относительно электрической прочности на пробой между ВН и НН. Наоборот, чрезмерно увеличенные изоляционные расстояния между ВН и НН для увеличения напряжения рассеяния всегда справедливо расцениваются как неудачное использование обмоточного пространства в окне трансформатора.

Измененить напряжение рассеяния, в данном случае увеличить напряжение рассеяния, можно проще всего изменяя либо число витков, либо изменяя высоту обмотки трансформатора, либо изменяя и то и другое вместе. При этих изменениях приходится изменять и D —диаметр сердечника.

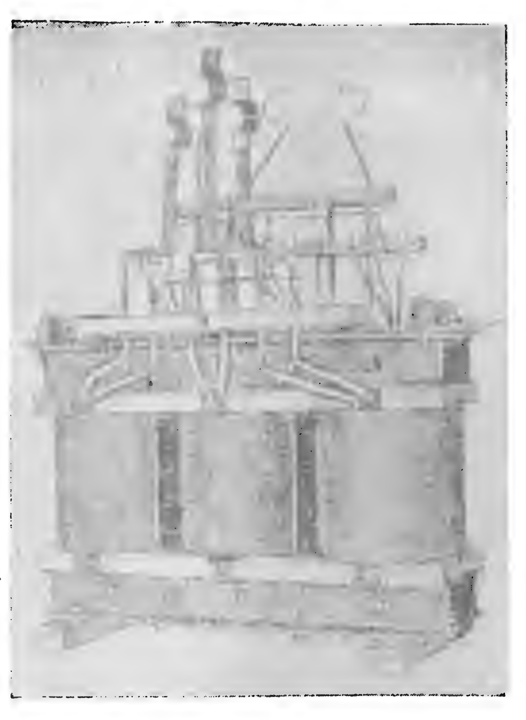
Если, например, при подгонке напряжения рассеяния расчета РТ-1 пойти по линии увеличения числа витков, то легко видеть, что число витков следовало бы увеличить в

$$\sqrt{\frac{4{,}95}{3{,}3}}=1{,}225 \text{ раз},$$

т. е. сделать равным 1,255·34 = 42 витка. Одновременно с этим пришлось бы уменьшить диаметр сердечника для того, чтобы сохранить достаточной величины насыщение стали. Так, желая сохранить индукцию порядка 13 800—14 000 *гс*, пришлось бы уменьшить диаметр сердечника в

$$\sqrt{\frac{42}{34}}=1{,}11 \text{ раз},$$

т. е. взять диаметр около 130 *мм*. В этом случае, однако, потери в стали сильно упали бы, так как при прежней высоте сердечника вес его уменьшился бы в отношении $\frac{34}{42}=0{,}81$. Вес ярма, повидимому, слегка увеличился бы, так как по условию в окно с прежней высотой около 375 *мм* надо уложить обмотки НН, содержащие не 34 витка, а 42. Соответственно возрастет и число витков в обмотке ВН. Поэтому радиальные размеры катушек возрастут. В обмотке НН потребуется тоже сделать канал, так как уже сейчас при 34 витках и при $H=375$ *мм* удельная тепловая нагрузка близка к предельному значению. Равным образом из-за возрастания числа витков пришлось бы увеличить число слоев в обмотке ВН.



Фиг. 6-3. Общий вид трансформатора мощностью 50 — 100 *ква* без бака.

Сейчас в РТ-1 потери в медных проводах ниже нормы, а потери в стали несколько выше нормы. При переходе на $D=130$ *мм* $H=375$ *мм*, $n=42$ витка следует ожидать повышения потерь в медных проводах примерно до

$$2\,175\,\frac{42}{34}=2\,700 \text{ вт}.$$

Изменение среднего диаметра обмоток будет несущественным. Поэтому в обмотке пришлось бы увеличить размер провода, т. е. взять провод следующего большого размера — не диаметром 1,95 *мм*, а диаметром 2,1 *мм*. Но тогда потери в медных проводах обмотки ВН, грубо говоря, будут равны:

$$1\,235\cdot\frac{42}{34}\cdot\frac{2{,}99}{3{,}46}=1\,310 \text{ вт},$$

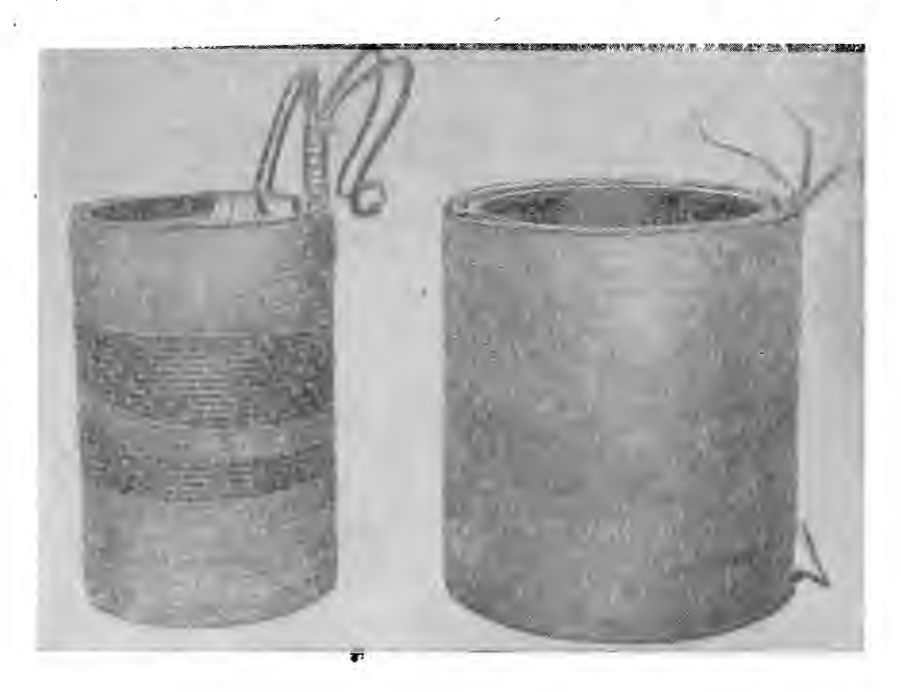
где 2,99 *мм*² и 3,46 *мм*² — сечения проводов диаметром 1,95 и 2,10 *мм*. Потери в обмотке НН возрастут несколько меньше из-за уменьшения среднего диаметра и будут примерно равны 1 100 *вт*.

В итоге потери в медных проводах будут несколько больше нормы, т. е. порядка 2 500 *вт*.

Зато потери в стали будут значительно ниже нормы, примерно на 20%. Поэтому целесообразнее с уменьшением диаметра сердечника увеличить индукцию в стали. Все же напряжение рассеяния слишком сильно возрастет (примерно на 10%) из-за возрастания радиального размера обмотки.

Таким образом, можно придти к выводу, что следовало бы взять сердечник с диаметром, несколько большим чем $D = 130$ *мм*, но индукцию повысить примерно до 14 200—14 500 *гс*.

Понижение числа витков ниже 42 приведет опять к понижению потерь в медных проводах. Уменьшать диаметр провода на стороне ВН вряд ли целесообразно, так как конструкция обмотки НН получилась бы слишком тяжелой. Наличие канала в этой обмотке существенно понизит ее удельную тепловую нагрузку. Поэтому целесообразнее не уменьшать диаметр 2,1 *мм* провода обмотки ВН, а уменьшить сечение провода НН, т. е. повысить плотность тока в обмотке НН.



Фиг. 6-4. Цилиндрическая и слоевая катушки.

Этот новый тип трансформатора 100 *ква* должен будет иметь меньший вес стали, но больший вес медных проводов. В результате этих общих соображений был сделан расчет при диаметре $D = 135$ *мм* [см. расчет РТ-2], который дает повышение стоимости лишь на несколько процентов по сравнению с трансформатором по расчету РТ-1. Правда, здесь потери в медных проводах и в стали остова несколько ниже нормальных. Напряжение же короткого замыкания достаточно хорошо соответствует требованиям стандарта.

Делая такие же ориентировочные прикидки, как при переходе от диаметра 145 к диаметру 135 *мм*, т. е. для случая изменения числа витков при неизменной высоте окна, можно получить модель, имеющую стандартное значение напряжения короткого замыкания, но при уменьшенной высоте обмотки. Очевидно, в этом случае необходимо будет увеличивать диаметр D сердечника, понижать индукцию и повышать плотность тока.

Наконец, можно одновременно изменять оба параметра вместе — и число витков и высоту. В качестве примера в расчете РТ-3 уменьшено

и число витков и высота обмотки. Таким образом, видно, что в области, прилегающей вокруг модели, найденной путем теоретического расчета можно получить большее разнообразие (5—6 модификаций) типов, удовлетворяющих заданным потерям и заданному напряжению короткого замыкания. Стоимости этих моделей будут на несколько процентов выше, чем стоимость модели, полученной путем теоретического расчета. Эти новые модели будут отличаться друг от друга тем, что у этих моделей будут разнообразные отношения веса стали к весу медных проводов. В расчете РТ-1 это отношение было равно 2,62, в РТ-2 около 2, в РТ-3 около 4.

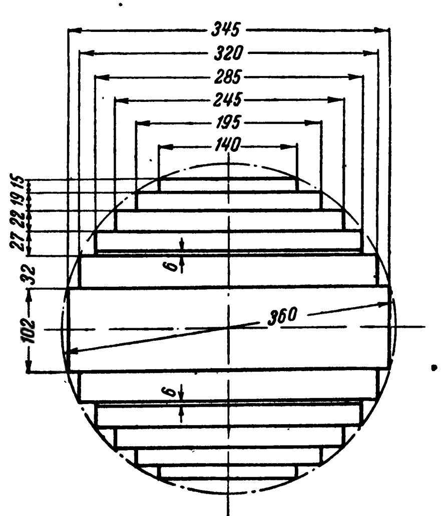
Конечно, можно было бы получить модели и с другими промежуточными отношениями весов меди и стали. Таким образом, теоретический расчет оказывается уже по одному полезным, что он дает некоторую точку, по отношению к которой можно сравнивать все варианты практических расчетов.

Числовой пример расчета бака для трансформатора по расчету РТ-3 был приведен ранее в § 5—5.

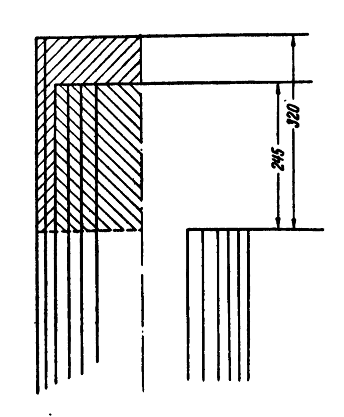
На фиг. 6-3 приведена фотография трехфазного трансформатора малой мощности (порядка 50—100 *ква*), а на фиг. 6-4—фотографии катушек.

6-3. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА 1 800 *ква*

Первые же варианты расчета трансформатора мощностью 1 800 *ква* на напряжения 35 000 ± 5%/6 300 *в* со схемой *У*/*D*—11 показали, что в теоретические расчеты (см. § 1-4) необходимо внести несколько поправок. Дело в том, что во всех теоретических расчетах для того, чтобы не загружать изложения мелкими деталями, было принято некоторое единообразие для приведения стандартных потерь в медных проводах к расчетным значениям. Последние всюду взяты на 5% меньше стандартных. Точно также коэффициенты заполнения σ_{cm} сечения стержня приняты равными 0,75.



Фиг. 6-5. Сечение стержня ∅ 360 *мм.*



Фиг. 6-6. Угол остова ∅ 360 *мм*

Более точный расчет сечения стержня диаметром 360 с пятью ступенями и двумя охлаждающими каналами (фиг. 6-5) показал, что коэф-

фициент заполнения σ_{cm} может быть повышен до 0,79. В данном случае применена лакированная сталь толщиной 0,35 *мм*, для которой коэффициент заполнения повышается до 0,9. Тогда получается, что активное сечение стержня будет равно 810 *см*². Размеры ярма для данного стержня показаны на фиг. 6-6. Активное сечение ярма получается равным 820 *см*², а вес углов ярма (заштрихованные части на фиг. 6-6) равен 348 *кг*.

С другой стороны, более точный учет особенностей конструкции обмотки и размеров проводов показывает, что стандартную цифру потерь следует уменьшить не на 5%, а на 7%. Это изменение вызвано в основном тем, что в обмотке ВН, кроме регулировочных витков, имеются еще входные витки с увеличенным сечением провода. Кроме того, следует иметь в виду, что весь теоретический расчет веса медных проводов ведется по среднему диаметру в окне, тогда как обмотка ВН имеет средний диаметр, который на 10—15% больше среднего диаметра в окне.

В силу этих соображений был произведен новый теоретический расчет при заданных потерях в медных проводах $P_м = 21\,300$ *вт* (вместо стандартных 24 000 *вт*) и в стали $P_{cm} = 8\,300$ *вт*. Индукция же была взята 14 500 *гс*, а все остальные коэффициенты получили следующие значения:

$$\alpha_м = 2{,}4, \quad \alpha_{cm} = 1{,}49 \text{ коэффициенты удельных потерь,}$$

$$\sigma_м = 0{,}15, \quad \sigma_{cm} = 0{,}79 \text{ коэффициенты заполнения,}$$

$$m = 3{,}5\,\frac{8{,}9}{7{,}55}\cdot\frac{0{,}15}{0{,}79} = 0{,}785 \text{ [см. формулу (1-13)],}$$

Тогда по формуле (1-17) получим

$$L_0 = \frac{14{,}9\cdot 1\,800}{\sqrt{21\,300\cdot 8\,300}}\sqrt{\frac{2{,}4\cdot 1{,}49}{0{,}15\cdot 0{,}79}} = 10{,}95 \text{ см},$$

$$L_0^3 = 1{,}31\cdot 10^3,$$

$$G_{cm} = \frac{8\,300}{3{,}13} = 2\,650 \text{ кг [см. (1-11)],}$$

где 3,13 — удельные потери в стали в *вт* на 1 *кг* при индукции 14 500 *гс*. Далее по (1-30) и (1-31) находим

$$g_{cm} = \frac{2\,650\cdot 10^3}{0{,}785\cdot 7{,}55\cdot 0{,}79} = 5{,}66\cdot 10^5 \text{ кг},$$

$$\Psi_1 = \frac{5{,}66\cdot 10^5}{1{,}31\cdot 10^3} = 432.$$

По кривым приложения II (лист 7) для значения $\Psi_1 = 432$ находим, что $y = 0{,}3$ и для этого значения $y = 0{,}3$ там же находим $x = 2{,}14$; $f_м = 0{,}83$; $f_{cm} = 14{,}15$ $D/L_0 = 3{,}11$.

Отсюда следует, что

$$D = 3{,}11\cdot 10{,}95 = 34{,}1 \text{ см} = 341 \text{ мм}; \quad D^3 = 39{,}7\cdot 10^3 \text{ см}^3; \quad H = 728 \text{ мм};$$

$$MO = 545 \text{ мм}$$

и, кроме того, получаем следующие значения веса медных проводов $G_м$ и, для проверки расчета, $G_{ст}$ веса стали [см. (1-25) и (1-26)];

$$G_м = 83{,}9 \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}83 \cdot 39{,}7 = 415\ кг,$$

$$G_{ст} = 5{,}93 \cdot 0{,}79 \cdot 14{,}15 \cdot 39{,}7 = 2\,680\ кг.$$

Тогда получаем, что плотность тока должна быть равна

$$\delta = \sqrt{\frac{21{,}300}{2{,}4 \cdot 415}} = 4{,}63\ \frac{а}{мм^2}.$$

Для этих теоретических размеров был сделан подробный расчет, приведенный в расчетной записке РТ-4.

Расчет сечений стержня с ∅ 340, ярма и других технических данных стержня и ярма дан уже ранее (см. § 2-5).

Так же как и в предыдущем примере, осевой размер обмотки НН определяется таким образом, что из общей высоты окна Н = 730 *мм* вычитаются изоляционные расстояния обмотки от верхнего и нижнего ярма по 60 *мм*. С точки зрения электрической прочности расстояние от обмотки НН до ярма можно было бы взять значительно меньше, например, 20 — 25 *мм*, однако это не рекомендуется, так как обмотка ВН имеет рабочее напряжение 35 *кв* и потому должна иметь изоляционное расстояние от ярма порядка 70 *мм*. Как уже указывалось ранее (см. § 5-4) большое различие осевых размеров обмоток ВН и НН приводит к появлению значительных механических усилий при коротких замыканиях. Поэтому всегда стремятся сделать почти одинаковыми осевые размеры обмоток ВН и НН.

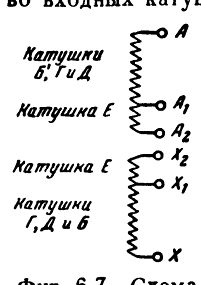
Ранее был уже приведен пример расчета непрерывной обмотки с заданным числом витков и заданным числом катушек. В данном случае следует пояснить способ выбора размеров проводов обмотки НН. Теоретический расчет показал, что плотность тока должна быть порядка 4,63 *мм*². Практика расчетов показывает, что наиболее плотное размещение витков, т. е. такое размещение, при котором для заданной высоты получается наименьший радиальный размер катушки, может быть достигнуто лучше всего тогда, когда в непрерывной обмотке взят возможно более высокий осевой размер провода и предельно малые размеры каналов между катушками. Однако, при заданной плотности тока произвольному увеличению осевого размера провода препятствует повышение удельной тепловой нагрузки катушки. Оказывается таким образом, что нагрев катушек ограничивает возможность увеличения осевого размера провода. Для плотностей тока порядка 4 — 4,5 *а/мм*² не следует брать осевой размер провода более 5,9 — 6,4 *мм*.

После предварительной прикидки катушек обмотки НН по формуле (3-13) сразу переходят к размещению витков обмотки ВН, так как этот расчет более кропотлив. В данном случае обмотка ВН, выполненная по схеме, показанной на фиг. 6-7, имеет более сложное строение, чем обмотка НН. В обмотке ВН имеются входные катушки, для которых применены провода с усиленной изоляцией и усиленным сечением. Для уменьшения механических усилий при коротком замыкании регулировочные витки расположены в середине высоты обмотки. Отпайки для регулировки напряжения расположены на переходах из одной катушки в другую, для того, чтобы при включении на любую ступень всегда отключалось бы целое число катушек. Поэтому для регулировочных витков пришлось ввести особый тип катушек *Е*. В этих катушках число витков несколько меньше, чем в главных катушках *Г* и *Д*. Для того чтобы радиальный размер регулировочных и главных катушек получился одним и тем же, приходится, как говорилось, разгонять витки в катуш-

ках *Е*, путем прокладки при намотке между витками полосок электрокартона (см. лист 2 РТ-4).

Главная часть обмотки состоит из катушек двух типов (катушки *Г* и *Д*), числа витков в которых отличаются на один виток. Способ расчета такой непрерывной обмотки с катушками, имеющими целое число витков, но отличающимися частично друг от друга на один виток был уже ранее показан (см. § 3-6).

Число витков регулировочных катушек точно задано. Число витков во входных катушках *Б* берется порядка 3—4%. Таким образом, число витков в главных катушках ориентировочно известно и, если по условиям размещения витков во входных катушках, приходится изменять число витков в главных катушках, то эта переделка приводит к простому перераспределению числа катушек *Г* и *Д*.



Фиг. 6-7. Схема обмотки ВН.

Осевое и радиальное строение обмоток показано на листе 3 РТ-4. Обмотка НН сделана тоже, как непрерывная катушка, у которой два типа дисковых катушек — типа П по 5 витков и типа Р — по 4 витка.

Катушки с четырьмя витками расположены в тех местах, где и в обмотке ВН уменьшается намагничивающая сила на единицу высоты обмотки, т. е. против входных и регулировочных витков.

В данном расчете сравнительно легко получается хорошее совпадение основных технических данных и веса активных материалов с данными и весом, полученными в предыдущем теоретическом расчете. Однако, напряжение короткого замыкания не соответствует тому значению, которое требуется по стандарту.

Так же как и в примере расчета трансформатора 100 *ква*, изменение значения напряжения короткого замыкания произведем путем изменения числа витков. Если по стандарту требуется $u_к = 6,5\%$ и $u_a = 1,33\%$, то получим, что

$$u_p = \sqrt{u_к^2 - u_a^2} = \sqrt{6,5^2 - 1,33^2} = 6,35\%.$$

Скидывая ориентировочно 8% на добавочное рассеяние, получим, что основное напряжение рассеяния должно равняться

$$\frac{6,35}{1,08} = 5,9\%,$$

тогда как основное напряжение рассеяния по листу 3 расчетной записи РТ-4 равно 4,27%.

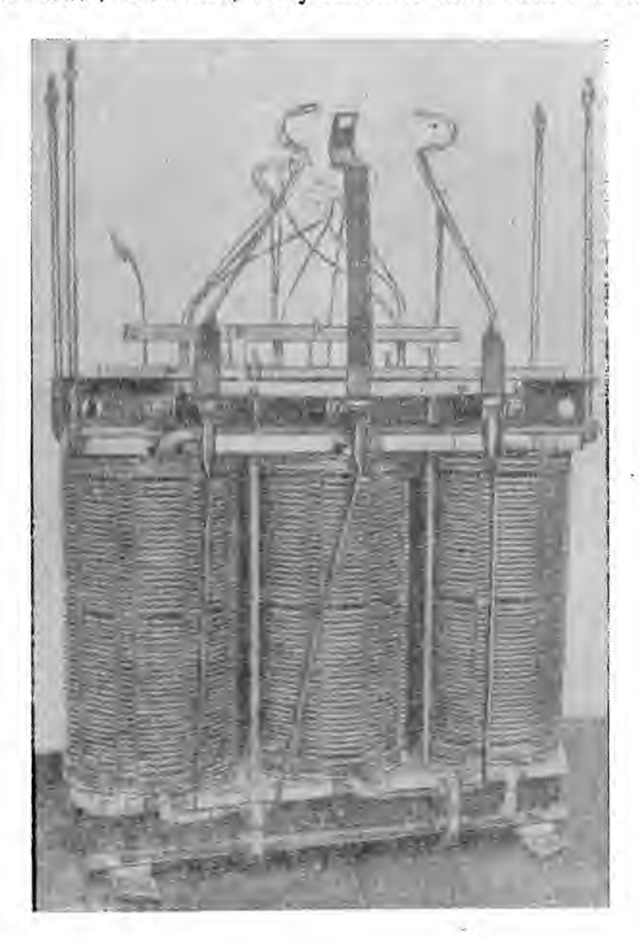
Для этого увеличим число витков в

$$\sqrt{\frac{5,9}{4,27}} = 1,19 \text{ раза},$$

для чего, грубо говоря, надо уменьшить диаметр в $\sqrt{1,18} = 1,1$ раза, т. е. на 10%. При этом можно считать, что не будет существенного уменьшения среднего диаметра канала рассеяния, ибо одновременно с увеличением числа витков придется увеличить радиальные размеры катушек.

Но так как с увеличением числа витков возрастут также и потери в медных проводах, грубо говоря, на 18%, то надо будет, очевидно, на 18% увеличить и сечение медных проводов. Поэтому можно ожидать, что вес медных проводов будет примерно в $1,18^2 = 1,38$ раза больше, чем в теоретическом расчете. Это есть так сказать „цена" изменения

напряжения рассеяния за пределы его „теоретического значения". Правда, в этом новом расчете потери в стали получатся несколько ниже нормы, ибо уменьшится вес стали, а индукция останется без изменения. Это уменьшение веса стали не сможет компенсировать увеличения веса меди, тем более, что увеличение числа витков и их сечения

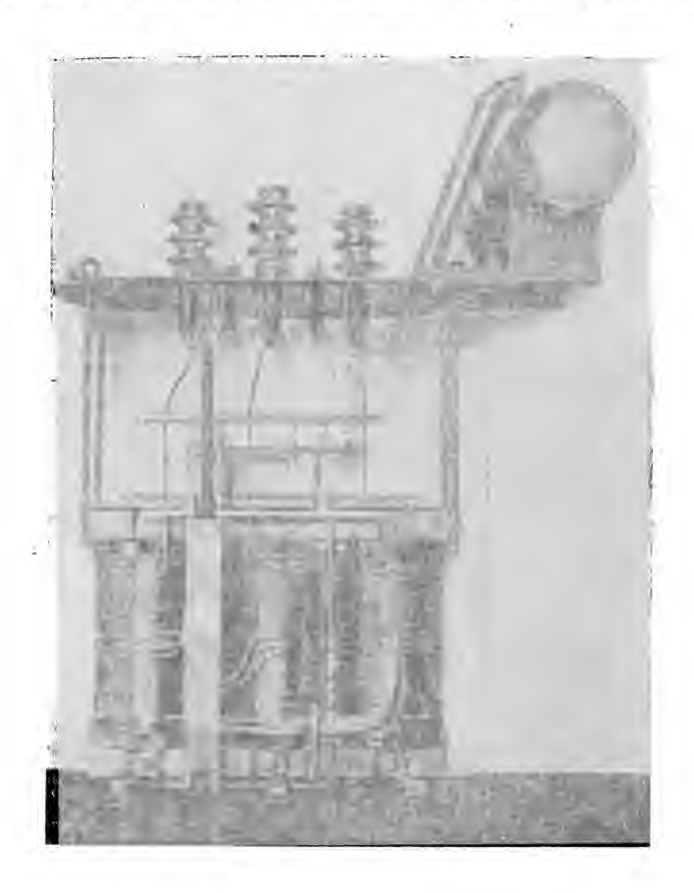


Фиг. 6-8. Общий вид трансформатора мощностью 1 800 *ква* без бака.

потребует, как указано выше, увеличения радиального размера обмоток, т. е. увеличится длина ярма. Поэтому вообще говоря недобор потерь в стали позволяет этот тип сделать более просторным.

В расчете РТ-5 произведен намеченный выше пересчет для получения заданного значения напряжения короткого замыкания. Раскладка витков в обмотках ВН и НН в основном мало отличается от раскладки в примере РТ-4. Как это только что было указано, пришлось понизить плотность тока для того, чтобы выдержать заданное значение потерь в медных проводах. Это понижение потерь позволило также несколько пони-

зить удельные тепловые нагрузки в катушках ВН. Однако, как это предвиделось, потери в стали оказались значительно ниже нормы. Когда для трансформатора 100 *ква* разбирался аналогичный случай подгонки значения напряжения короткого замыкания к стандартному, то там вопрос понижения потерь в стали ниже нормы решался простым незначитель-



Фиг. 6-9. Общий вид трансформатора мощностью 1 000 *ква* без бака.

ным повышением индукции. В данном случае этот способ неприменим, так как индукция уже имеет предельное значение 14500 *гс*. Поэтому дальнейшая подгонка всех технических данных стандартным значениям может быть проведена либо путем одновременного понижения высоты и увеличения диаметра обмоток или путем несколько более свободного размещения витков в окне, т. е. путем увеличения канала между обмотками с одновременным увеличением высоты обмотки. Последний способ даст, конечно, более просторную модель, которая будет удобна для разных пересчетов на другие коэффициенты трансформации, но потребует зато большего расхода активных материалов.

Модели же с пониженной высотой конструктивно будут менее удачны, так как остов трансформатора будет приземистый с обмотками, у которых катушки будут иметь большой радиальный размер. Такие обмотки неудобны для изготовления и потому более трудоемки.

Краткие указания о размерах бака и числе рядов труб для трансформатора по расчету РТ-5 были уже ранее даны у § 5-5. Там было



Фиг. 6-10. Общий вид трансформатора мощностью 1 000 *ква* в баке.

также указано, что для данного трансформатора бак должен был бы иметь 3 ряда труб при общем числе труб в ряде от 60 до 66 шт. Для более мощных трансформаторов часто применяют уже радиаторные баки.

На фиг. 6-8 показана фотография трансформатора с обмоткой ВН в виде непрерывной катушки. Обмотка НН этого трансформатора соединена в треугольник. Ввиду того, что у этого трансформатора обмотка ВН выполнена на 6 000 *в*, конструкция отводов НН сильно упрощена. Конструкция обмоток трансформаторов мощностью 1 000 — 560 *ква* на 35 000 *в* значительно сложнее из-за того, что приходится применять непрерывные обмотки, у которых между двумя катушками, имеющими внутренний переход, делается не охлаждающий канал, а устанавливается шайба из электротехнического картона. Эта шайба позволяет сблизить эти катушки и тем самым уменьшить высоту обмотки. Правда, при этом теряется половина охлаждающей поверхности обмотки. Однако

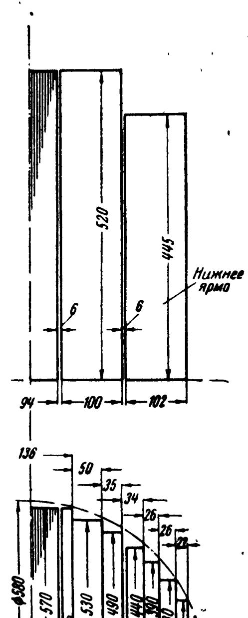
в этом случае ток в обмотке ВН столь мал, что, применяя даже самые малые размеры проводов прямоугольного сечения, все же получается весьма низкая плотность тока в обмотке ВН и замена масляных каналов шайбами у половины числа каналов не вызывает чрезмерного повышения температуры. Общий вид со стороны отводов ВН такого трансформатора показан на фиг. 6-9.

Слева между крайней и средней фазой помещены переключатели для переключения ступеней напряжения на $\pm$ 5%. Для защиты переключателей от пробоя на стенку бака эти переключатели закрыты листом из электротехнического картона.

На фиг. 6-10 приведен общий вид этого трансформатора, помещенного в трубчатый бак.

6-4. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА 15 000 *ква*

В качестве последнего примера в расчетной записке РТ-6 приведен расчет высоковольтного мощного трансформатора с тремя обмотками на 110, 38,5 и 11 *кв*,



Фиг. 6-11. Сечение сердечника ⌀ 580 *мм* и ярма.

Поскольку вопросам подгонки расчетных значений напряжений короткого замыкания к стандартным значениям было уже уделено значительное внимание, в расчетной записке РТ-6 приведен расчет, где все технические параметры уже более или менее приведены в соответствие с требованиями стандарта.

Размеры листов стали и толщины пакетов сечения стержня приведены на фиг. 6-11.

Обмотка на 110 *кв* имеет наиболее сложное строение — (см. лист 3, РТ-6). Входные катушки *A* и *B* намотаны из проводов с усиленной изоляцией. Помимо этого, катушки еще забандажированы кабельной бумагой толщиной 5 *мм* на сторону для катушки *A* и 4 *мм* для катушки *B*.

Таким образом, осевой размер забандажированной катушки *A* равен 15,5 + 2,5 = 25,5 *мм*. Над катушкой *A* помещается еще емкостное кольцо, которое создает более равномерное первоначальное распределение напряжения по слоям катушек при импульсных воздействиях. Катушки *C* и частично *B* служат для того, чтобы получить более плавное изменение, строения катушек при переходе от входных катушек к главным.

Регулировочные витки размещены таким образом, чтобы отпайки для регулировки напряжения приходились бы после целого числа катушек *E* для обмотки на 110 *кв* и катушек *M* для обмотки на 38,5 *кв*. Регулировочные катушки расположены по середине высоты обмоток, которые выполнены по схеме фиг. 6-12. Средняя ступень напряжения получается при соединении концов A_2 и X_2, наибольшая — при соединении концов A_3 и X_3, а наименьшая — при соединении концов A_1 и X_1.

Размещение остальных обмоток по отношению к обмотке на 110 *кв* диктуется заданными значениями напряжений короткого замыкания по отношению к обмотке 110 *в*. Согласно указаниям стандарта эти значения напряжений короткого замыкания относятся к мощности наиболее мощ-

ной обмотки. Поэтому на листе 4 расчетной записки РТ-6 все расчеты напряжений рассеяния сделаны для 159 витков 455 *а* (т. е. по обмотке НН, имеющей мощность 15 000 *ква*).

Осевое и радиальное строение всех трех обмоток приведено на листе 3 расчета РТ-6. На том же листе даны основные размеры изоляционных цилиндров, масляных каналов и расстояний от ярма всех обмоток. Некоторые детали этих изоляционных расстояний указаны в приложении VII (лист 6).

Подсчет потерь в медных проводах произведен по обычным формулам (5-5) для каждого типа катушек. При этом для главных и входных катушек в эту формулу подставляется полный вес их, для регулировочных же катушек *E* и *M* только половина их веса, так как только половина этих катушек бывает включена на среднюю ступень напряжения, остальные регулировочные катушки оказываются не включенными.

Расчет добавочных потерь показывает, что они сравнительно малы — от 1 до 4%, что дает указание о том, что сечения проводов и их размещение сделаны более или менее удачно.

Расчет удельных и тепловых нагрузок и температур привиден на листе 4 расчета РТ-6 [см. также (5-34). Расчет температур произведен согласно приложения XI (листы 1 и 2).

Коэффициент 0,85, введенный в расчет на листе 1 РТ-6, учитывает дутьевое охлаждение бака [см. приложение XI (лист 5)].

Фиг. 6-12. Схема обмотки ВН.

Так как превышение температуры обмотки СН по расчету равно 28°С, то среднее повышение температур масла должно быть не более

$$70 - 28 = 42°C.$$

Для трансформаторов с дутьевым охлаждением можно допустить $12 \frac{вт}{м^2 °C}$ или 600 *вт* на 1 $м^2$ при среднем превышении температур 50°С (см. приложение XI, лист 5). Так как действительное среднее превышение температуры масла должно быть лишь 42°С, то по таблице листа 2 того же приложения XI найдем, что отношению превышений температур

$$\frac{42}{50} = 0,84$$

соответствует отношение 1:1,25 удельных тепловых нагрузок, т. е. в данном случае допустима удельная тепловая нагрузка бака

$$\frac{600}{1,25} = 480 \frac{вт}{м^2}.$$

Следовательно, для суммарных потерь 184 — 190 *квт*, необходимо, чтобы суммарная поверхность была равна

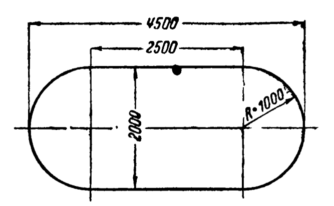
$$\frac{190}{480} = 396 \approx 400 \ м^2.$$

Ориентируясь на табл. 5-1, можно для трансформатора по РТ-6 принять следующие размеры бака в плане $4\,500 \times 2\,000$ *мм²* с закруглением на узкой стороне (фиг. 6-13) бака.

Высота бака принята равной 3 000 *мм*. Так как высота ярма равна 220 *мм* (фиг. 6-3), а высота стержня равна 1 460 *мм*, то общая высота остова трансформатора равна

$$2 \cdot 520 + 1\,460 = 2\,500 \text{ мм.}$$

От нижней поверхности нижнего ярма до дна бака должно быть расстояние порядка 30-50 *мм*. Тогда сверху над ярмом останется всего лишь 470 — 450 *мм*, что является наименьшей допустимой цифрой.



Фиг. 6-13. Размеры бака в плане.

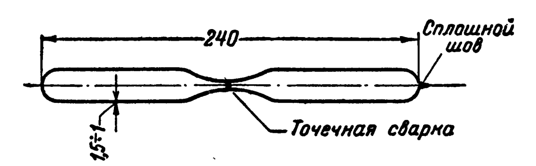
Легко видеть, что поверхность бака равна

$$3{,}0\,(2 \cdot 25 + \pi \cdot 2) = 33{,}8 \approx 34 \text{ м}^2.$$

Таким образом, радиаторы должны иметь суммарную поверхность

$$400 - 34 = 366 \text{ мм}^2.$$

Если в данном случае применить двойные волнистые радиаторы с шириной волны 240 *мм* и с 16-ю волнами на радиаторе, то получится



Фиг. 6-14. Размеры волны радиатора.

следующий расчет их числа. Периметр двух сторон двух волн, показанных на фиг. 6-14, равен

$$2 \cdot 2 \cdot 240 = 960 \text{ мм},$$

а периметр всего радиатора с 16-ю рядами волн равен

$$16 \cdot 0{,}96 = 15{,}3 \text{ м}.$$

Высота радиатора должна быть несколько меньше, чем высота бака, примерно на 350 — 400 *мм*. В данном случае можно считать, что высота радиаторов будет равна 2 600 *мм*. Тогда поверхность одного двойного радиатора равна

$$15{,}3 \cdot 2{,}6 = 40\ м^2,$$

а всего, следовательно, понадобилось бы

$$\frac{366}{40} = 9 \text{ радиаторов.}$$

Так как ширина такого радиатора около 600 — 650 *мм*, то по периметру бака, равному 11,28 *м*, можно было бы разместить

$$\frac{11{,}28}{0{,}65 + 0{,}15} = \text{около } 14 \text{ радиаторов,}$$

здесь 0,15 или 150 *мм* в знаменателе есть просвет между радиаторами. Требуется, однако, всего лишь 9 радиаторов, т. е. места для размещения радиаторов на стенке бака вполне достаточно. Тем не менее было бы более целесообразным несколько увеличить высоту бака с тем, чтобы довести число радиаторов до 8. В этом случае радиаторы разместятся на баке симметрично, более свободно и не будут мешать ни подъемным крюкам, ни кранам. Вместе с тем, увеличится пространство над верхним ярмом, что облегчит подход отводов от обмоток к высоковольтным выводам.

Объем настоящей книги не позволяет подробно осветить особенности расчета целого ряда специальных трансформаторов, как-то трансформаторов с регулировкой под нагрузкой, трансформаторов для электропечей, для ртутных выпрямителей, пусковых автотрансформаторов, заземляющих катушек, модуляционных трансформаторов, трансформаторов для питания специальных ламп и тому подобных разновидностей специальных трансформаторов. Расчеты специальных трансформаторов во всех деталях представляют интерес лишь для узкого круга лиц, работающих по их расчету.

Количество выпускаемых специальных трансформаторов, конечно, значительно меньше, чем обычных трансформаторов для энергосистем. Поэтому вопросы расчета специальных трансформаторов имеют уже второстепенное значение для общего развития трансформаторостроения.

Расчетная записка (к примеру § 6-2) — *РТ-1* Лист 1

Трехфазный трансформатор с естественным масляным охлаждением

100 *ква*

6 300 — 6 000 — 5 700/230 *в*

96,2 /251 *а*

935 — 890 — 845 /34 витков

50 *гц* | Схема и группа $Y/Y_0 - 12$

Коэффициент использования сечения 0,85	Сталь, толщина в *мм*	Диаметр в *мм*	Сечение в *см*²	Расстояние между осями в *мм*	Высота окна в *мм*	Вес в *кг*	Индукция в *гс*	$K_{ст}$	Потери в *вт*	$K_т$	P_{i0}, в *ва*
стержня	0,35	145	127	255	375	108	13 850	2,72	294	—	
ярем	0,35		131			101,0 22,6	13 450	2,52	312	—	
Общий вес медных проводов 87,9 *кг*			Общий вес стали 231,6 *кг*				$U/n = 3,90$	$P_{ст} = 606$		ΣP_{i0}	

Потери				
Нагрузка	—	100 *ква*	—	—
Ступень напряжения	—	100%	—	—

Ток холостого хода				
По расчету	—%	По нормам	6,5 %	—%
Падение напряжения				
	По расчету	По расчету	По нормам	По нормам

Потери в медных проводах, *вт*	ВН	—	1 235	—	—
	НН	—	940	—	—
	Сумма	—	2 175	—	—
Добавочные потери в %		—	3	—	—
$P_м$ в *вт*		—	2 240	—	—
$P_{ст}$ в *вт*		—	603	—	—
Общие потери, *вт*		—	2 846	—	—
По нормам	$P_м$	—	2 400	—	—
	$P_{ст}$	—	600	—	—
	Общие потери	—	3 000	—	—

Нагрузка	100 *ква*	—	100 *ква*	—
Ступени напряжения	100%	—	100%	—
u_a	2,24%	—%	2,4%	—%
u_p	3,53%	—%	—%	—%
$u_к$	4,18%	—%	5,5%	—%

Испытательное напряжение по нормам	
ВН	25 *кв*
НН	5 *кв*

Поверхности в *м*²	
Бака	
волн	
труб	
радиат.	
Дутье	
Вода	
Масло	

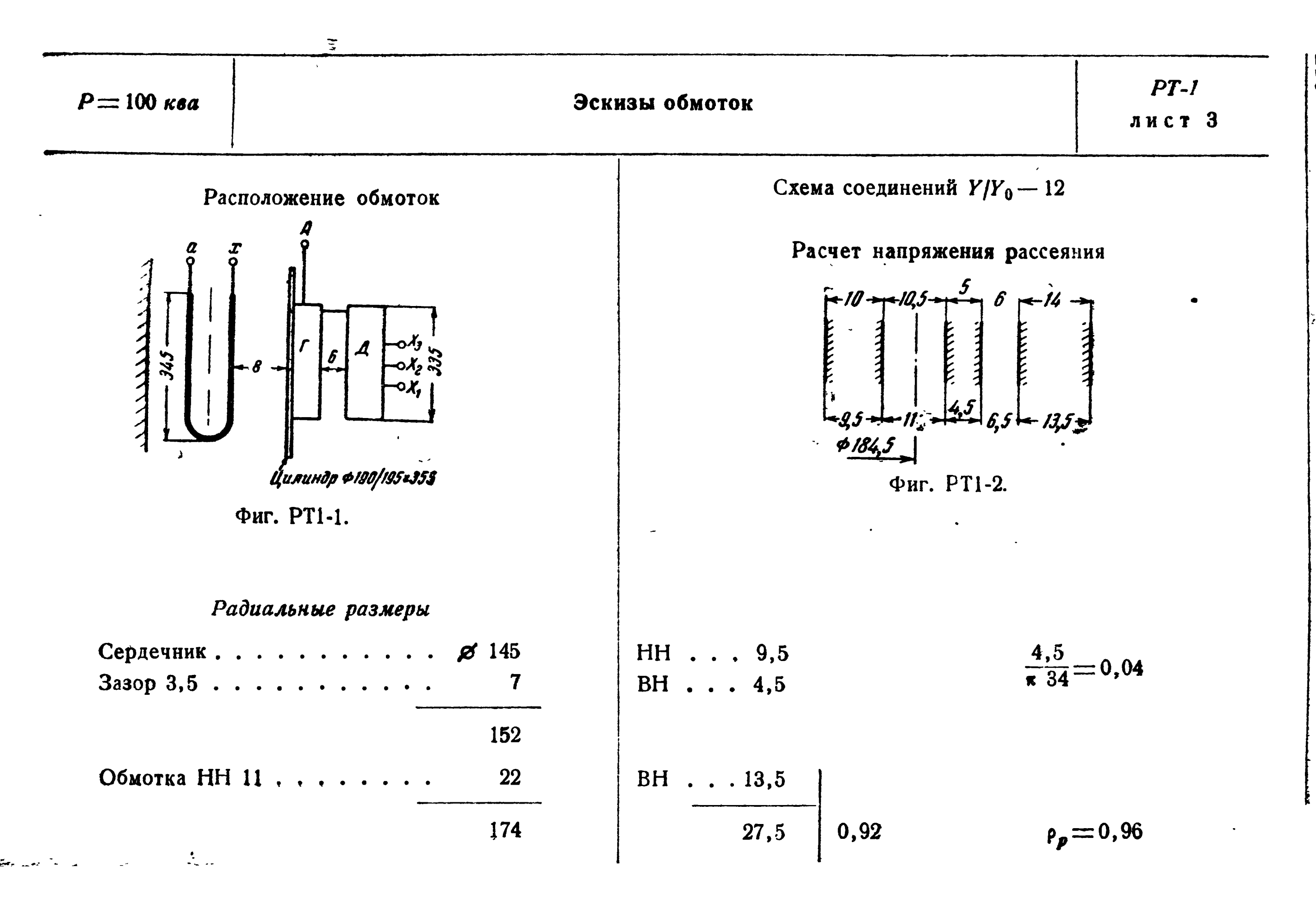
Превышение температур

Нагрузка	100 *ква*				— *ква*			
	$\overline{q}$	τ_1 в °C	Поправка	τ в °C	$\overline{q}$	τ_1 в °C	Поправка	τ в °C
ВН	670							
НН	1 400							
Масло								

$P = 100$ *ква*		Число стержней 3		Изоляция от ярма 20/15 *мм*						*РТ-1* Лист 2	
Обмотка		ВН — 6 300 ± 5% *в*					НН — 230 *в*				
Обозначение катушек		*Г*	*Д*	—	—	—	*П*	—	—		
Общее число витков		280	655	—	—	—	34	—	—		
Число катушек		1	1	—	—	—	1	—	—		
Число витков в катушке		280	655	—	—	—	34	—	—		
Число слоев		2	5	—	—	—	2	—	—		
Число витков в слое		140	140	—	—	—	17	—	—		
Провод	голый	⌀1,95 *мм*	⌀1,95 *мм*	—	—	—	8,6×4,4	9,3×4,4	—		
	изолированный	Норм.	Норм.	—	—	—	Норм.	Норм.	—		
Число параллельных проводов		—	—	—	—	—	2	—	—		
Вес проводов в *кг*	голых	52		—	—	—	35,9		—		
	изолированных	54,5		—	—	—	38		—		
Размеры катушек в *мм*	осевой	335	335	—	—	—	345	—	—		
	радиальный	5	14	—	—	—	11	—	—		

Диаметры катушек в *мм*: внутренний	195	217	—	—	—	152	—	—		
Диаметры катушек в *мм*: внешний	205	245	—	—	—	174	—	—		
Изоляция между слоями в *мм*	2×0,12	2×0,12	—	—	—	2×0,12	—	—		
Канал между катушками	6		—	—	—	—	—	—		
Промежуточные шайбы	—	—	—	—	—	—	—	—		
Ответвления	После 845 и 890 витков		—	—	—	—	—	—		
Изоляция катушек	—	—	—	—	—	—	—	—		
Направление намотки	Левая	Левая	—	—	—	Левая	—	—		
Средний диаметр в *мм*	220		—	—	—	163	—	—		
Ток в *a*	9,16		—	—	—	251	—	—		
Сечение провода в *мм*²	2,99		—	—	—	36,9	40	76,9		
Плотность тока в *а/мм*²	3,22		—	—	—	3,27	—	—		
I^2R в *вт*	1 235		—	—	—	940 (2%)	—	—		
% добавочных потерь	Отводы 3%					—	—	—		
$P_м$ в *вт*	1 235		—	—	—	940	—	—		
г	См. лист 3		—	—	—	См. лист 3	—	—		
*м*²	1,85		—	—	—	0,675	—	—		
$P_м/м^2$	670		—	—	—	1 400	—	—		

$P = 100$ *ква*	**Эскизы обмоток**	*РТ-1* лист 3



Фиг. РТ1-1.

Фиг. РТ1-2.

Радиальные размеры

Сердечник	⌀ 145
Зазор 3,5	7
	152
Обмотка НН 11	22
	174

НН . . . 9,5

ВН . . . 4,5

$$\frac{4{,}5}{\pi \, 34} = 0{,}04$$

ВН . . . 13,5

27,5 | 0,92

$\rho_p = 0{,}96$

Канал 8	16
	⌀ 190
Цилиндр 2,5	5
	195
Обмотка ВН 25	50
	245
	← 10 →
	МО = 255

Канал . . 1,0	1,1
Канал . . 0,65	$0,29\left(\frac{4}{6}\right)^2$
4,50	2,31

$$u'_p = \frac{34 \cdot 251 \cdot 18,45 \cdot 2,31 \cdot 0,96}{798 \cdot 34 \cdot 3,9} = 3,30\%$$

$$\tau = 7\%$$

$$u_p = 3,53; \quad (u_p)^2 = 12,4$$

$$u_a^2 = 5$$

$$u_k^2 = 17,4$$

$$u_k = 4,18$$

Поверхность охлаждения

Обмотки ВН	9,42·3·0,220·0,335	= 2,09
Рейки	3·8·2·0,015·0,335	= 0,24
		1,85 *м*²
Обмотки НН	9,42·1,5·0,163·0,345	= 0,795
Рейки	3·8·0,015·0,345	= 0,12
		0,675 *м*²

Расчетная записка (к примеру § 6-2)	*РТ-2* лист 1

Трехфазный трансформатор с естественным масляным охлаждением

100 *ква*

6 300 — 6 000 — 5 700/230 *в*

9,62 /251 *а*

1 040 — 990 — 940/38 витков

50 *гц* | Схема и группа $Y/Y_0 - 12$

0,85	Сталь толщина в *мм*	Диаметр в *мм*	Сечение в *см²*	Расстояние между осями в *мм*	Высота окна в *мм*	Вес в *кг*	Индукция в *гс*	κ_{cm}	Потери в *вт*	κ_m	P_{i0} в *ва*
Стержень	0,35	135	110	265	370	92,4	14 300	2,99	276	31,4	3 000
Ярмо	0,35		112			89,6 18,5	14 050	2,83	306	27,5	2 970

Общий вес медного провода 100,8 *кг*	Общий вес стали 200,5 *кг*	$U/n=35$	$P_{cm}=582$	$\Sigma P_{i0}=5\,970$

Потери				
Нагрузка	—	100 *ква*	—	—
[illegible] напряжения	—	100%	—	—

Ток холостого хода				
По расчету	6%	По нормам	6,5%	— %
Падение напряжения				
	По расчету	По расчету	По нормам	По нормам

Потери в медных проводах в *вт*	ВН	—	1 190	—	—
	НН	—	1 180	—	—
	Сумма	—	2 370	—	—
Добавочные потери %		—	—	—	—
$P_м$ в *вт*		—	2 370	—	—
P_{cm} в *вт*		—	582	—	—
Общие потери в *вт*		—	2 952	—	—
По нормам	$P_м$	—	2 400	—	—
	P_{cm}	—	600	—	—
	Общие потери	—	3 000	—	—

Нагрузка	—	100 *ква*	100 *ква*	—
Ступень напряжения	—	100%	100%	—
u_a	—%	2,37%	2,4%	—%
u_p	—%	4,75%	—%	—%
$u_к$	—%	5,34%	5,5%	—%

Испытательное напряжение по нормам
ВН 25 *кв*
НН 5 *кв*

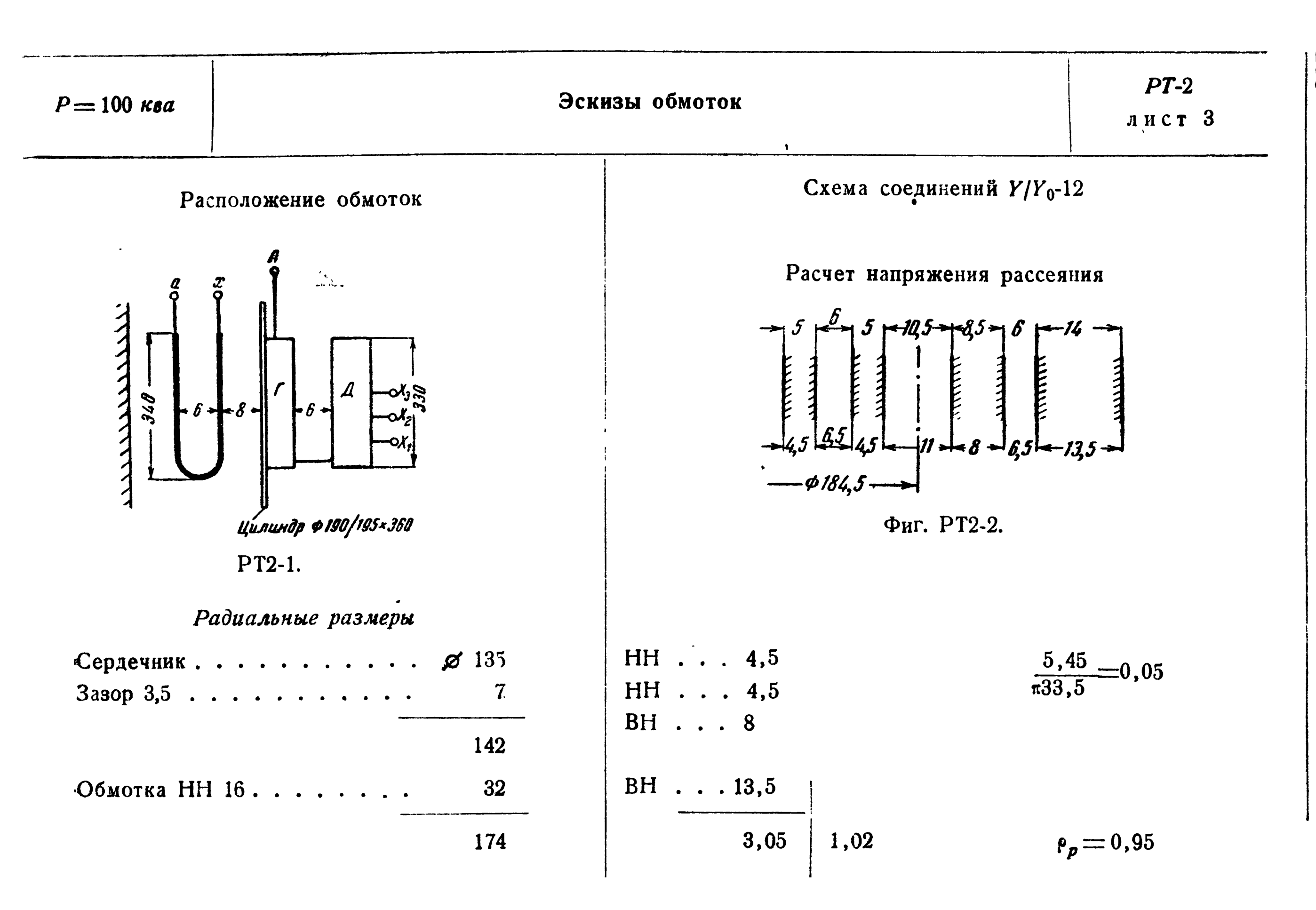
Поверхности в $м^2$	
бака	
волн	
труб	
радиат.	
Дутье	
Вода	
Масло	

Превышения температур

Нагрузка	100 *ква*							
	q	τ_1 в °C	Поправка $\Delta\tau$	τ в °C	q	τ_1 в °C	Поправка $\Delta\tau$	τ в °C
ВН	650							
НН	870							
Масло								

$P = 100$ *ква*		Число стержней 3		Изоляция от ярма 20/15 *мм*						PT-2 лист 2	
Обмотка		ВН 6 300 ± 5% *в*					НН — 230 *в*				
Обозначение катушек		*Г*	*Д*	—	—	—	*П*	—	—	—	—
Общее число витков		393	647	—	—	—	38	—	—	—	—
Число катушек		1	1	—	—	—	1	—	—	—	—
Число витков в катушке		393	647	—	—	—	38	—	—	—	—
Число слоев		3	5	—	—	—	2	—	—	—	—
Число витков в слое		131	131	—	—	—	19	—	—	—	—
Провод	голый	⌀ 2,1	⌀ 2,1	—	—	—	7,4×4,4	8,0×4,4	—	—	—
	изолированный	Норм.	Норм.	—	—	—	Норм.	Норм.	—	—	—
Число параллельных проводов		—	—	—	—	—	2	—	—	—	—
Вес проводов в *кг*	голых	67,5		—	—	—	33,3		—	—	—
	изолированных	71		—	—	—	35	—	—	—	—
Размеры катушек в *мм*	осевой	330	330	—	—	—	340	—	—	—	—
	радиальный	8,5	14	—	—	—	16	—	—	—	—

Диаметры катушек в *мм*	внутренний	195	224	—	—	—	142	—	—	—	—
	внешний	212	252	—	—	—	174	—	—	—	—
Изоляция между слоями в *мм*		2×0,12	2×0,2	—	—	—	—	—	—	—	—
Канал между катушками в *мм*		6		—	—	—	6	—	—	—	—
Промежуточная шайба		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ответвления		после 940 и 990 витков		—	—	—	—	—	—	—	—
Изоляция катушек		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Направление намотки		Левая	Левая	—	—	—	Левая	—	—	—	—
Средний диаметр в *мм*		223,5		—	—	—	158	—	—	—	—
Ток в *а*		9,16	9,16	—	—	—	251	—	—	—	—
Сечение провода в *мм*²		3,46	3,46	—	—	—	31,7	34,3	66	—	—
Плотность тока в *а/мм*²		2,78	2,78	—	—	—	3,81	—	—	—	—
I^2R в *вт*		1 190		—	—	—	1 160	—	—	—	—
% добавочных потерь		—		—	—	—	2%	—	—	—	—
$P_м$ в *вт*		1 190		—	—	—	1 180	—	—	—	—
k		См. эскиз		—	—	—	См. эскиз		—	—	—
$м^2$		1,84		—	—	—	1,36		—	—	—
$P_м/м^2$		650		—	—	—	870		—	—	—



$P = 100$ *ква*	**Эскизы обмоток**	*РТ*-2 лист 3

Расположение обмоток

РТ2-1.

Радиальные размеры

Сердечник	Ø 135
Зазор 3,5	7
	142
Обмотка НН 16	32
	174

Схема соединений Y/Y_0-12

Расчет напряжения рассеяния

Фиг. РТ2-2.

НН . . . 4,5		
НН . . . 4,5		
ВН . . . 8		
ВН . . . 13,5		
3,05	1,02	

$$\frac{5,45}{\pi 33,5} = 0,05$$

$$e_p = 0,95$$

Канал 8	16
	⌀ 190
Цилиндр 2,5	5
	195
Обмотка ВН 28,5	57
	252
	← 13 →
	МО = 265

Канал . . 1,10	1,1	$\left(\frac{1}{2}\right)^2$
Канал . . 0,65	0,16	
Канал . . 0,65	0,25	$(^5/_8)^2$
5,45	2,53	

$$u_p = \frac{38 \cdot 251 \cdot 18,45 \cdot 2,53 \cdot 0,95}{798 \cdot 3,5 \cdot 33,5} = 4,52$$

$\tau = 5\%$

$u'_p = 4,75\%$ $\qquad (u'_p)^2 = 22,5$

$u_к = 5,34\%$ $\qquad u_a^2 = 5,9$

$u_к = 28,4$

Поверхность охлаждения

Обмотки ВН	9,42·3·0,2235·0,33	= 2,08
Рейки	3·8·2·0,015·0,33	= 0,24
		1,84 *м²*
Обмотки НН	9,42·3,5·0,158·0,33	= 1,72
Рейки	3·8·3·0,015·0,33	= 0,36
		1,36 *м²*

Расчетная записка (к примеру § 6-2) — *РТ-3*, лист 1

Трехфазный трансформатор с естественным масляным охлаждением

100 *ква*

6 600 — 6 300 — 6 000/230 *в*

9,16 /251 *а*

832 — 794 — 757/29 витков

50 *гц* | Схема и группа Y/Y_0—12

0,85	Сталь толщина в *мм*	Диаметр в *мм*	Сечение в *см²*	Расстояние между осями в *мм*	Высота окна в *мм*	Вес в *кг*	Индукция в *гс*	$\kappa_{ст}$	Потери в *вт*	$\kappa_т$	*P* в *ва*
Стержень	0,5 лак	155	155	290	225	81	13 350	2,88	234	—	—
Ярмо	То же		184			195	11 200	2,0	390	—	—

Общий вес медных проводов 70 *кг* | Общий вес стали 276 *кг* | $U/n=4,59$ | $P_{ст}=624$ | ΣP_{i0}

Потери				
Нагрузка	—	100 *ква*	—	—
Ступень напряжения	—	100%	—	—

Ток холостого хода				
Расчет	—%	По нормам	6,5	%
Падение напряжения				
	По расчету	По расчету	По нормам	По нормам

Потери в медных проводах в *вт*	ВН	—	1 295	—	—
	НН	—	1 145	(2%)	—
	Сумма	—	2 440	—	—
Добавочные потери, %		—	—	—	—
$P_м$, *вт*		—	2 440	—	—
P_{cm}, *вт*		—	624	—	—
Общие потери, *вт*		—	3 064	—	—
По нормам	$P_м$	—	2 400	—	—
	P_{cm}	—	600	—	—
	Общие потери	—	3 000	—	—

Нагрузка	—	100 *ква*	100 *ква*	—
Ступень напряжения	—	100%	100%	—
u_a	—%	2,44%	2,4%	%
u_p	—%	5,05%	—%	%
$u_к$	—%	5,6%	5,5%	%

Испытательные напряжения по нормам
ВН 25 *кв*
НН 5 *кв*

Поверхности в $м^2$	
бака	
волн	
труб	
радиат.	
Дутье	
Вода	
Масло	

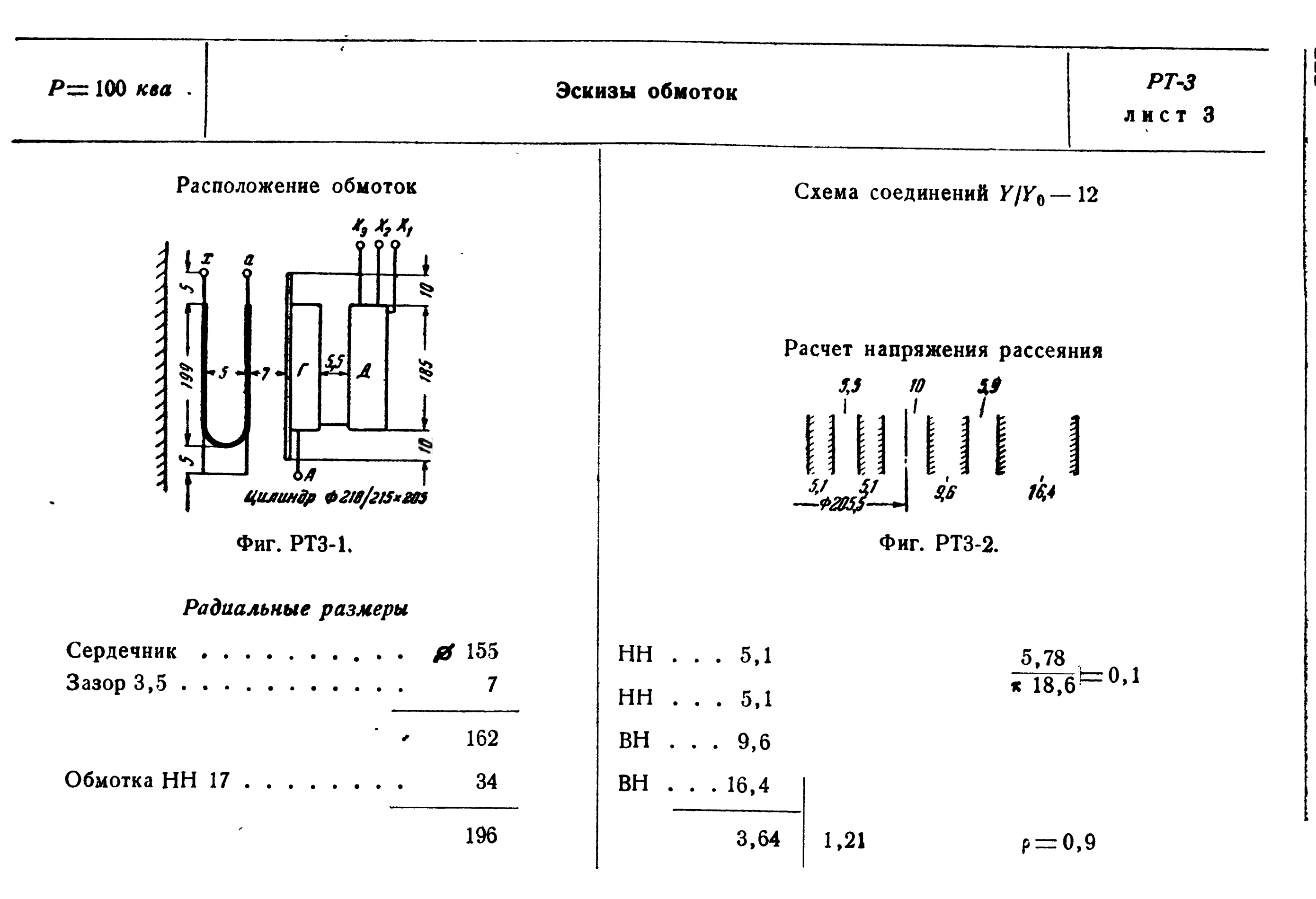
Превышения температур

Нагрузка	100 *ква*				*ква*			
	q	τ_1 в °C	Поправка $\Delta\tau$	τ в °C	q	τ_1 в °C	Поправка $\Delta\tau$	τ в °C
ВН	1 100	23						
НН	1 175	25						
Масло								

$P = 100$ *ква*		Число стержней 3		Изоляция от ярма 20/13 *мм*						РТ-3 лист 2	
Обмотка		ВН — 6 300 ± 5% *в*					НН — 230 *в*				
Обозначение катушек		*Г*	*Д*	—	—	—	*П*	—	—	—	—
Общее число витков		320	512	—	—	—	29	—	—	—	—
Число катушек		1	1	—	—	—	1	—	—	—	—
Число витков в катушке		320	512	—	—	—	29	—	—	—	—
Число слоев		4	7	—	—	—	2	—	—	—	—
Число витков в слое		82	82	—	—	—	14,5	—	—	—	—
Провод	голый	⌀ 1,81 *мм*	⌀ 1,81 *мм*	—	—	—	11,6×5,1	—	—	—	—
	изолированный	Норм.	Норм.	—	—	—	Норм.	—	—	—	—
Число параллельных проводов		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Вес проводов в *кг*	голых	44,4		—	—	—	25,6	—	—	—	—
	изолированных	46,5		—	—	—	27	—	—	—	—
Размеры катушек в *мм*	осевой	185	185	—	—	—	199	—	—	—	—
	радиальный	10	17	—	—	—	17	—	—	—	—
Диаметры катушек в *мм*	внутренний	215	246	—	—	—	162	—	—	—	—
	внешний	235	280	—	—	—	196	—	—	—	—

Изоляция между слоями в *мм*	2×0,12	2×0,12	—	—	—	—	—	—	—	—
Канал между катушками в *мм*	5,5		—	—	—	5	—	—	—	—
Промежуточная шайба	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ответвления	после 757 и 791 витков		—	—	—	—	—	—	—	—
Изоляция катушек	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Направление намотки	Левая	Левая	—	—	—	Левая	—	—	—	—
Средний диаметр в *мм*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ток в *а*	9,16	9,16	—	—	—	251	—	—	—	—
Сечение провода в *мм*²	2,57	2,57	—	—	—	58,8	—	—	—	—
Плотность тока в *а/мм*²	3,57	3,57	—	—	—	4,27	—	—	—	—
I^2R в *вт*	1 295		—	—	—	1 120	—	—	—	—
% добавочных потерь	—		—	—	—	2%	—	—	—	—
$P_м$ в *вт*	1 295		—	—	—	1 145	—	—	—	—
k	—		—	—	—	—	—	—	—	—
*м*²	1,18		—	—	—	0,975	—	—	—	—
$P_м/м^2$	1 100		—	—	—	1 175	—	—	—	—

$P = 100$ *ква*	**Эскизы обмоток**	*РТ-3* лист 3



Расположение обмоток

Фиг. РТ3-1.

Схема соединений $Y/Y_0 - 12$

Расчет напряжения рассеяния

Фиг. РТ3-2.

Радиальные размеры

Сердечник . . . . ⌀ 155
Зазор 3,5 7

162

Обмотка НН 17 34

196

НН . . . 5,1
НН . . . 5,1
ВН . . . 9,6
ВН . . . 16,4

3,64 | 1,21

$$\frac{5,78}{\pi\ 18,6} = 0,1$$

$\rho = 0,9$

Канал 7	14
	⌀ 210
Цилиндр 2,5	5
	215
Обмотка ВН 32,5	65
	280
	←10→
	МО = 290

Канал . . 1,00	1,00
Канал . . 0,59	0,23 $\left(\frac{7}{11}\right)^2$
Канал . . 0,55	0,14
5,78	2,58

$$u_p = \frac{251 \cdot 29 \cdot 20{,}55 \cdot 2{,}58 \cdot 0{,}9}{798 \cdot 4{,}59 \cdot 18{,}6} = 5{,}05$$

$u_p^2 = 25{,}5$

$u_a^2 = 5{,}9$

31,4

$u_к = 5{,}6\%$

Поверхность охлаждения

Обмотка ВН	$3\pi \cdot 0{,}185\,(0{,}235 + 0{,}246 + 0{,}28)$	= 1,31
Рейки	$8 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 0{,}015 \cdot 0{,}185$	= 0,13
		1,18 *м*²
Обмотка НН	$3 \cdot \pi\, 0{,}199\,(1{,}5 \cdot 0{,}162 + 2 \cdot 0{,}196)$	= 1,19
Рейки	$8 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 0{,}015 \cdot 0{,}199$	= 0,215
		0,985 *м*²

Расчетная записка (к примеру § 6-3)	*РТ-4* лист 1

Трехфазный трансформатор с естественным масляным охлаждением

1 800 *ква*

35 000 ± 5% / 6 300 *в*

29,7 / 165 *а*

914 — 870 — 826 / 272 витков

50 *гц* | Схема и группа Y/*D* — 11

	Сталь толщина в *мм*	Диаметр в *мм*	Сечение в *см*²	Расстояние между осями в *мм*	Высота окна в *мм*	Вес в *кг*	Индукция в *гс*	k_{cm}	Потери в *вт*	k_m	*P* в *ва*
Стержень		340	719	555	730	1 190	14 500	3,13	3 730	—	—
Ярмо		—	729	—	—	1 220 300	14 300	3,02	4 590	—	—
Общий вес медных проводов 419 *кг*			Общий вес стали 2 710				$U/n = 23{,}2$	$P_{cm} = 8\,320$		—	—

Потери				
Нагрузка	—	1 800 *ква*	—	—
Ступень напряжения	—	100%	—	—

Ток холостого хода				
Расчет	—%	По нормам	5	%
Падение напряжения				
	По расчету	По расчету	По нормам	По нормам

Потери в медных проводах, *вт*	ВН	—	13 200	—	—
	НН	—	9 600	—	—
	Сумма	—	22 800	—	—
Добавочные потери, *вт*		—	—	—	—
$P_м$, *вт*		—	22 800	—	—
$P_{ст}$, *вт*		—	8 320	—	—
Общие потери, *вт*		—	31 120	—	—
По нормам	$P_м$	—	24 000	—	—
	$P_{ст}$	—	8 300	—	—
	Общие потери	—	32 300	—	—

Нагрузка	—	1 800 *ква*	1 800 *ква*	—
Ступень напряжения	—	100%	100%	—
u_a	—%	1,27%	1,33%	—%
u_p	—%	4,61%	—%	—%
$u_к$	—%	4,77%	6,5%	—%

Испытательное напряжение по нормам
ВН—85 *кв*
НН—25 *кв*

Поверхности в $м^2$	
бака	
волны	
труб	
радиат.	
Дутье	
Вода	
Масло	

Превышения температур

Нагрузка	1 800 *ква*							
	q	τ_1 в °C	Поправка $\Delta\tau$	τ в °C	q	τ_1 в °C	Поправка $\Delta\tau$	τ в °C
ВН	1 135	25,5	—	25,5	—	—	—	—
НН	1 370	32	—	32		—	—	—
Масло								

$P = 1\,800$ *ква*		Число стержней 3				Изоляция от ярма 70/60 *мм*				*РТ-4* лист 2	
Обмотка		ВН = 35 000 ± 5% *в*					НН = 6 300 *в*				
Обозначение катушек		*Б*	*Г*	*Д*	*Е*	—	*П*	*Р*	—	—	—
Общее число витков		28	510	288	88	—	200	72	—	—	—
Число катушек		4	34	18	8	—	40	18	—	—	—
Число витков в катушке		7	15	16	11	—	5	4	—	—	—
Число слоев		7	15	16	11	—	5	4	—	—	—
Число витков в слое		1	1	1	1	—	1	1	—	—	—
Провод	голый	6,9×2,83	4,4×1,35			—	6,4×3,28		—	—	—
	изолированный	8,3×4,23	4,8×1,75			—	6,9×3,78		—	—	—
Число параллельных проводов		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Вес проводов в *кг*	голых	22	212			—	185		—	—	—
	изолированных	24	223			—	194		—	—	—
Размеры катушек в *мм*	осевой	8,3	4,8	4,8	4,8	—	6,9	6,9	—	—	—
	радиальный	30	27	29	29	—	19,5	16	—	—	—
Диаметры катушек в *мм*	внутренний	467	467	467	467	—	374	374	—	—	—
	внешний	527	521	525	523	—	413	406	—	—	—

Изоляция между слоями в *мм*	—	—	—	Разгон 8	—	—	—	—	—	—
Канал между катушками в *мм*	6	6 и 4		4	—	4	4	—	—	—
Промежуточная шайба в *мм*	—	—	—	Разрыв 15	—	—	—	—	—	—
Ответвления	—	—	—	После катушек *E*	—	—	—	—	—	—
Изоляция катушек в *мм*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Направление намотки	Левая	Левая	Левая	Левая	—	Левая	Левая	—	—	—
Средний диаметр в *мм*	497	494	496	495	—	393,5		—	—	—
Ток в *а*	29,7	29,7	29,7	29,7	—	95,4	95,4	—	—	—
Сечение провода в *мм²*	19	5,73			—	20,5	20,5	—	—	—
Плотность тока в *а/мм²*	1,57	5,19			—	4,65	4,65	—	—	—
I^2R в *вт*	≈ 150	13 050			—	9 600		—	—	—
% добавочных потерь	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$P_м$ в *вт*	13 200				—	9 600		—	—	—
k	См. эскиз обмотки				—	См. эскиз обмотки		—	—	—
$м^2$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$t_м/м^2$	—	—	1 135	—	—	1 370	—	—	—	—

$P = 1\,800$ *ква*	**Эскиз обмоток**	*РТ-4* лист 3

Радиальные размеры

Сердечник	∅ 340
Канал 5	10
	350
Цилиндр 4	8
	358
Канал 8	16
	374
Обмотка НН 19,5 . . .	39
	413
Канал 13,5	27
	440
Цилиндр 5	10
	450
Канал 8,5	17
	467
Обмотка ВН 29	58
	525
	←30→
	МО=555

Осевые размеры

Обмотка НН

58 кат. 6,9 =	400
57 кан. 4 =	228
	628
От ярма 2×60	120
	748
Прессовка 18	18
	H = 730

Обмотка ВН

4Б×8,3	33,2
34Г×4,8	163,0
18Д×4,8	83,4
8Е×4,8	38,4
Каналы 8×6	48
54×4	216
Разрыв	15
	600,0
От ярма 2×70	140
	740
Прессовка 10	10
	H = 730

Расчет напряжения рассеяния

Канал	13,5	НН 19,5 — 0,5 = 19
Цилиндр	5	ВН 29,0 — 0,5 = 28,5
Канал	8,5	

27 + 0,5 = 27,5
413
Ср. диаметр 440

4,75	1,58
2,75	2,75
7,50	4,33

$1 - \pi \cdot 60,0 = 1 - 0,04 \qquad \rho_p = 0,96$

$$u'_p = \frac{2,72 \cdot 95 \cdot 4 \cdot 44,0 \cdot 4,33 \cdot 0,96}{798\ 60 \cdot 23,2} = 4,27\%$$

$\tau = 8\% \qquad u_p = 4,61\%$

$u_p^2 = 21,2$

$$u_a^2 = \frac{1,6}{22,8}\ u_k = 4,77\%$$

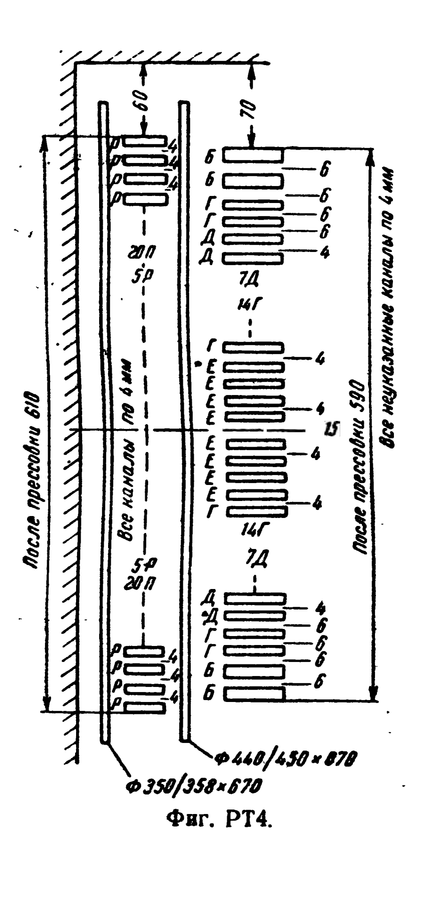
Удельные тепловые нагрузки

ВН 29
29
58
10
68

$$21,4\ \frac{16 \cdot 29,7 \cdot 5,19 \cdot 1,02}{68 \cdot 07} = 1\ 135\ \textit{вт/м}^2$$

НН 19,5
19,5
39
14
53

$$21,4\ \frac{5 \cdot 95,4 \cdot 4,65 \cdot 1,02}{53 \cdot 0,67} = 1\ 370\ \textit{вт/м}^2$$



Фиг. РТ4.

Расчетная записка (к примеру § 6-3)	PT-5 лист 1
Трехфазный трансформатор с естественным масляным охлаждением	
	1 800 *ква*
35 000±5% / 6 300 *в*	
29,7 / 165 *а*	
1 100 — 1 048 — 996 / 328 витков	
50 *гц* | Схема и группа $Y/D-11$	

—	Сталь толщина в *мм*	Диаметр в *мм*	Сечение в *см*²	Расстояние между осями в *мм*	Высота окна в *мм*	Вес в *кг*	Индукция в *гс*	k_{cm}	Потери в *вт*	k[illegible]	P_{i0} в *ва*
Стержень	—	310	596	540	760	1 025	14 500	3,13	3 210	34,8	35 700
Ярмо	—	—	605	—	—	988 222	14 300	3,02	3 650	31,4	35 700

Общий вес медных проводов 526 *кг*	Общий вес стали 2 235 *кг*	$U/n = 19{,}2$	$P_{cm} = 6\,860$ | $\Sigma P_{i0} = 71\,400$

Потери				
Нагрузка	—	1 800 *ква*	—	—
Ступень напряжения	—	100%	—	—

Ток холостого хода				
Расчет	4%	По нормам	5	%
Падение напряжения				
Нагрузка	—	1 800 *ква*	1 800 *ква*	—

Потери в медных проводах, *вт*	ВН	—	13 500	—	—
	НН	—	10 200	—	—
	Сумма	—	23 700	—	—
Добавочные потери в *вт*		—	400	—	—
$P_м$, *вт*		—	24 100	—	—
P_{cm}, *вт*		—	6 860	—	—
Общие потери в *вт*		—	30 600	—	—
По нормам	$P_м$	—	24 000	—	—
	P_{cm}	—	8 300	—	—
	Общие потери	—	32 300	—	—

Ступень напряжения	—	100%	100%	—
	Расчет	Расчет	По нормам	По нормам
u_a	—%	1,34%	1,33%	—%
u_p	—%	6,4%	—%	—%
$u_к$	—%	6,56%	6,5%	—%

Испытательные напряжения
ВН—85 *кв*
НН—25 *кв*

Поверхность	
бака	
волн	
труб	
радиат.	
Дутье	
Вода	
Масло	

Превышения температур								
Нагрузка, *квт*	1 800 *ква*							
	q	τ_1 в °C	Поправка $\Delta\tau$	τ в °C	q	τ_1 в °C	Поправка $\Delta\tau$	τ в °C
ВН	892	25	—	25	—	—	—	—
НН	1 300	31	—	31	—	—	—	—
Масло								

$P = 1\,800$ *ква*		Число стержней 3			Изоляция от ярма 70/60 *мм*					*РТ-5* лист 2	
Обмотка		ВН = 35 000 ± 5% *в*					НН = 6 300 *в*				
Обозначение катушек		*Б*	*Г*	*Е*	—	—	*П*	*Р*	—	—	—
Общее число витков		44	952	104	—	—	288	40	—	—	—
Число катушек		4	56	8	—	—	48	8	—	—	—
Число витков в катушке		11	17	13	—	—	6	5	—	—	—
Число слоев		11	17	13	—	—	6	5	—	—	—
Число витков в слое		1	1	1	—	—	1	1	—	—	—
Провод	голый	6,9×1,68	4,4×1,56		—	—	6,9×3,28		—	—	—
	изолированный	8,3×3,08	4,8×1,96		—	—	7,4×3,78		—	—	—
Число параллельных проводов		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Вес проводов в *кг*	голых	20	282		—	—	224		—	—	—
	изолированных	22	296		—	—	235		—	—	—
Размеры катушек в *мм*	осевой	8,3	4,8	4,8	—	—	7,4	7,4	—	—	—
	радиальный	23,5	34,5	34,5	—	—	23,5	19,5	—	—	—
Диаметры в *мм*	внутренний	465	445	445	—	—	344	344	—	—	—
	внешний	512	514	514	—	—	391	383	—	—	—

Изоляция между слоями в *мм*	—	—	Разгон 8	—	—	—	—	—	—	—
Канал между катушками в *мм*	6	6 и 4		16 прокл. по 30 *мм*		4	4	12 прокл. по 30 *мм*	—	—
Промежуточная шайба в *мм*	—	—	Разрыв 15	—	—	—	—	—	—	—
Ответвления	—	—	После катушки *E*	—	—	—	—	—	—	—
Изоляция катушек	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Направление намотки	Левая	Левая	Левая	—	—	Левая	Левая	—	—	—
Средний диаметр в *мм*	488,5	479,5		—	—	367,5		—	—	—
Ток в *а*	29,7	29,7	29,7	—	—	95,4	95,4	—	—	—
Сечение провода в *мм*²	11,4	6,65	6,65	—	—	22,1	22,1	—	—	—
Плотность тока в *а/мм*²	2,61	4,47		—	—	4,31		—	—	—
I^2R в *вт*	330	12 900		—	—	10 000		—	—	—
% добавочных потерь	—	2%	—	—	—	2%		—	—	—
$P_м$, *вт*	13 500			—	—	10 200		—	—	—
k	См. эскиз			—	—	См. эскиз		—	—	—
*м*²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$P_м/м^2$	—	892	—	—	—	1 300	—	—	—	—

$P = 1\,800$ *ква*	Эскиз обмоток	*РТ-5* лист 3

Радиальные размеры

Сердечник	⌀ 310
Канал 5	10
	320
Цилиндр 4	8
	328
Канал 8	16
	344
Обмотка НН 23,5	47
	391
Канал 14,5	29
	420
Цилиндр 5	10
	430
Канал 7,5	15
	445
Обмотка ВН 34,5	69
	514
	←26→
	$MO = 540$

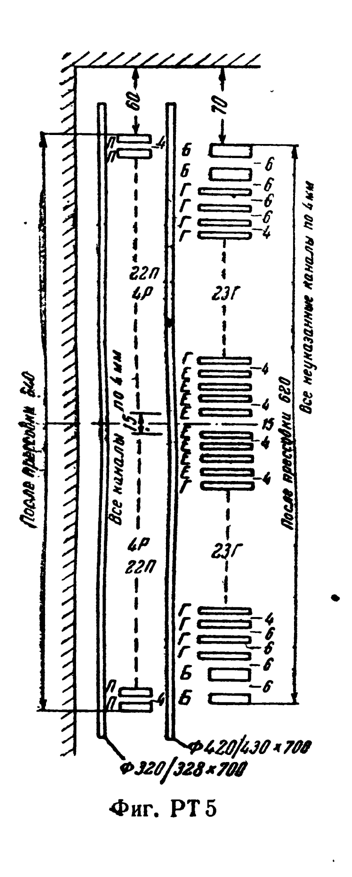
Осевые размеры

Обмотка НН

56·7,4	415
55 кан. 4	220
	635
От ярма 2×60	120
	755
Разрыв 15	15
	770
Прессовка 10	10
	$H = 760$

Обмотка ВН

4Б×8,3	33,2
56Г× 4,8	268,8
8Е× 4,8	38,4
	340,4
Каналы 8×6	48
58×4	232
Разрыв	15
	635,4
	~636
От ярма 2×70	140
	776
Прессовка	16
	$H = 760$



Фиг. РТ 5

Расчет напряжения рассеяния

Канал	14,5			
Цилиндр	5	НН 23,5 — 0,5 = 23		
Канал	7,5	ВН 34,5 — 0,5 = 34		
	27 + 0,5 = 27,5		57	1,9
	391		275	2,75
	418 = Ср. диам., $\rho = 0,95$		$0,035 = \pi \cdot 630$	4,65

$$u'_p = \frac{328 \cdot 95,4 \cdot 41,8 \cdot 4,65 \cdot 0,96}{798 \cdot 63,0 \cdot 19,2} = 6,05\%$$

$\tau = 6\%$ $u_p = 6,4\%$ $u_p^2 = 41,2$

$u_a^2 = 1,8$

$u_к = 6,56\%$ 43,0

Удельная тепловая нагрузка

ВН 34,5
34,5
69

$$21,4 \frac{17 \cdot 29,7 \cdot 4,47 \cdot 1,02}{79 \cdot 0,7} = 892 \text{ вт/м}^2$$

10
79

НН 23,5
23,5
47

$$21,4 \frac{6 \cdot 95,4 \cdot 4,31 \cdot 1,02}{62 \cdot 0,67} = 1\,300 \text{ вт/м}^2$$

15
62

Расчетная записка (к примеру § 6-4)	*РТ-6* лист 1

Трехфазный трансформатор с естественным масляным охлаждением

15 000	/ 10 000	/ 15 000 *ква*
110 000 ± 2 (2,5%)	/38 500 ± 2 (2,5%)/	11 000 *в*
79	/ 150	/ 787 *а*
918 ± 2 (283)	/ 322 ± 2 (8)	/ 159 витков
50 *гц*	Схема и группа $Y_0/Y_0/D$-12-11	

	Сталь толщина в *мм*	Диаметр в *мм*	Сечение в *см*²	Расстояние между осями в *мм*	Высота окна в *мм*	Вес в *кг*	Индукция в *гс*	k_{cm}	Потери в *вт*	k_m	P_{i0} в *ва*
Стержень	0,5 лак	580	2 151	1 260	1 460	7 100	14 500	3,57	25 400	34,8	244 000
Ярмо	0,5 лак	—	2 264	—	—	10 460	13 800	3,12	32 600	24,2	253 000

Общий вес медного провода 3 611 *кг*	Общий вес стали 17 560 *кг*	$U/n = 69,18$	$P_{cm} = 58\,000$	$\Sigma P_{i0} = 497\,000$

Потери						Ток холостого хода				
Нагрузка в *ква*	ВН	10 000	15 000	—	—	Расчет	3,3%	Норма	4%	%
	СН	10 000	—	10 000	—	Падение напряжения				
	НН	—	15 000	10 000	—		По расчету	По расчету	По нормам	По нормам

Потери в медных проводах в *вт*	ВН	31 150	70 050	—	—
	СН	29 550	—	29 550	—
	НН	2 600	48 350	21 500	—
	Общая сумма	63 300	118 400	51 050	—
Добавочные потери в *вт*		7 200	7 300	1 350	—
$P_м$ в *вт*		70 500	125 700	52 400	—
$P_{ст}$ в *вт*		57 600	58 000	57 600	—
Общие потери в *вт*		128 100	183 700	110 000	—
По нормам	$P_м$	—	132 000	—	—
	$P_{ст}$	—	63 000	—	—
	Общая сумма	—	195 000	—	—
ВН	q	—	1 000	—	—
	τ в °C	—	23	0,85	19,5
СН	q	1 400	—	—	—
	τ в °C	33	—	0,85	28
НН	q	—	1 120	—	—
	τ в °C	—	2,75	0,85	24,5

Нагрузка	*ква*	15 000	10 000	15 000
u_a	ВН-СН	—	—	—
	ВН-НН	0,84	—	—
	СН-НН	—	0,524	—
u_p	ВН-НН	16,8	—	—
	ВН-НН	10,4	—	—
	СН-НН	5,7	—	—
$u_к$	ВН-СН	16,8	—	17
	ВН-НН	10,4	—	10,5
	СН-НН	5,8	—	6

Испытательное напряжение			Бак	
ВН	230 *кв*	1 мин.	Радиатор	—
СН	85 *кв*	1 мин.	Радиатор	—
НН	35 *кв*	1 мин.	Дутье	230 *м³/мин*
			Масло	
			Вода	

$P = 15\,000$ *ква* | Число стержней 3 | **Изоляция от ярма 120/120/120 *мм*** | *РТ-6* лист 2

Обмотка		ВН = 110 000 ± 2 (2,5%)					СН = 38 500 ± 2 (2,5%)			НН = 11 000	
Обозначение катушек		*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*K*	*L*	*M*	*S*	*P*
Общее число витков		20	20	128	612	184	16	290	32	159	
Число катушек		2	2	8	36	16	4	60*	8	4	78
Число витков в катушке		10	10	16	17	11 9/18	4	4 15/18	4	1 15/18	1 17/18
Число слоев		10	10	16	17	11 9/18	4	4 15/18	4	1 15/18	1 17/18
Число витков в слое		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Провод	голый	12,5×2,83		8,0×2,26			12,5×3,8	9,3×1,81		8×3,8	
	изолированный	15,45×5,78		9,95×4,21			13,85×5,15	Норм.		Норм.	
Число параллельных проводов		—	—	—	—	—	—	2		4	4
Вес проводов в *кг*	голых	128		1 497			44	612		1 350	
	изолированных	154		1 767			47	640		1 383	
Размеры катушек в *мм*	осевой	15,5	15,5	10,0	10,0	10,0	13,9	9,8	9,8	8,5	8,5
	радиальный	60	60	71	76	64	23	25	25	37	37
Диаметры катушек в *мм*	внутренний	1 032	1 030	1 020	1 008	1 032	654	654	654	804	804
	внешний	1 152	1 150	1 162	1 160	1 160	700	704	704	878	878

Изоляция между слоями в *мм*	—	—	—	—	Разгон 5×2	—	—	Разгон 5×1	—	—
Канал между катушками в *мм*	См. лист 3					См. лист 3			См. лист 3	
Промежуточная шайба в *мм*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ответвления	—	—	—	—	После 2*E*	—	—	После 2*M*	—	—
Изоляция катушек	Каб. бум. 5 *мм*	Каб. бум. 4 *мм*	—	—	—	—	—	—	—	—
Направление намотки	Левая	Левая	Левая	Левая	Левая	Левая	Левая	Левая	Левая	Левая
Средний диаметр, *мм*	1 092	1 090	1 091	1 084	1 096	677	679	679	841	841
Ток в *а*	79	79	79	79	79	150	150	150	455	455
Сечение проводов в *мм*²	35,1		17,8			47,2	33,4		120,4	
Плотность тока в *а/мм*²	2,25		4,44			3,18	4,49		3,78	
I^2R в *вт*	69 000					29 300			46 400	
% добавочных потерь	(1,5%)	1 050				(1%)	250		(4,2%) 1 950	
$P_м$ в *вт*	70 050					29 550			48 350	
k	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
*м*²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$P_м/м^2$	—	—	—	1 000	—	—	1 400	—	—	1 120

P = 15 000 *ква*	Эскизы обмоток	*РТ-6* лист 3

Осевые размеры

ВН

2А	51
2В	47
60×10	600
Каналы	698
Разрыв	29
6×12	72
4×10	40
52×8	416
	1 255
Прессовка	35
	1 220
От ярма	240
	1 460

СН

4К	56
68×9,8	667
Каналы	723
Разрыв	86
8×18	64
2×13	26
60×6,5	390
	1 229
Прессовка	9
	1 220
От ярма	240
	1 460

НН

82×8,5	697
Каналы	
7×18	126
74×5,5	407
	1 230
Прессовка	10
	1 220
От ярма	240
	1 460

Радиальные размеры

Сердечник	580	
Канал 10	20	
		600
Цилиндр 7	14	
		614
Канал 20	40	
		654
Обмотка СН 25	50	
		704
Канал 33	66	
		770
Цилиндр 7	14	
		784
Канал 10	20	
		804
Обмотка НН 37	74	
		878
Канал 11	22	
		900
Цилиндр 9	18	
		918
Канал 16	32	
		950
Цилиндр 9	18	
		968
Канал 20	40	
		1 008
Обмотка ВН 76	152	
		1 160
	←100→	
	МО =1 260	

Примечания: *1*—цилиндр ⌀ 600/614×1350; *2*—цилиндр ⌀770/784×1350, *3*—цилиндр ⌀900/918—1350; *4* — цилиндр ⌀950/968—1250. *I*—все неуказанные каналы по 6,5 *мм*; *II*—все неуказанные каналы по 5 *мм*; *III* — все неуказанные каналы по 8 *мм*.

Фиг. РТ6-1.

$P = 15\,000$ *ква*	**Вспомогательные расчеты**	РТ-6 лист 4

Расчет напряжения рассеяния

Ф679 Ф841 Ф1084
25 СН 50 37 НН 65 76 ВН
Ф754 Ф943
152
Ф856

$\frac{1}{3}bD = 0{,}82 \times 67{,}9 = 55{,}6$ $aD = 5 \times 75{,}4 = 376{,}8$ $1{,}23 \times 84{,}1 = 103{,}5$ $aD = 6{,}5 \times 94{,}3 = 612$ $\frac{1}{3}bD = 2{,}53 \times 108{,}4 = 274$

$aD = 15{,}2 \times 85{,}6 = 1300$

Фиг. РТ6-2.

$$\sum\left(\frac{1}{3}bD + aD\right)$$

ВН—СН	ВН—НН	СН—НН
274	274	103,5
1 300	612	376
55,6	103,5	55,6
1 629,6	989,5	535,1
~1 630	~990	~535

ВН—СН $u_p = \dfrac{159 \cdot 455 \cdot 1\,630 \cdot 0{,}95}{798 \cdot 121 \cdot 69{,}18} = 16{,}8\%$

ВН—НН $u_p = \dfrac{159 \cdot 455 \cdot 990 \cdot 0{,}95}{798 \cdot 121 \cdot 69{,}18} = 10{,}2\% + (2\%) = 10{,}4\%$

СН—НН $u_p = \dfrac{159 \cdot 455 \cdot 535 \cdot 0{,}95}{798 \cdot 121 \cdot 69{,}18} = 5{,}5\% + (4\%) = 5{,}7\%$

Тепловой расчет

ВН	НН	СН
18 подкл. по 50 *мм*	18 подкл. по 40 *мм*	18 подкл. по 30 *мм*
Средний диаметр 1 084 *мм*	Средний диаметр 841 *мм*	Средний диаметр 679 *мм*
$\frac{18\cdot 50}{\pi\cdot 1\,080}=0{,}26 \quad \kappa\approx 0{,}75$	$\frac{18\cdot 40}{\pi\cdot 841}=0{,}27 \quad \kappa\approx 0{,}75$	$\frac{18\cdot 30}{\pi\cdot 679}=0{,}25 \quad \kappa\approx 0{,}75$

Периметры

ВН	НН	СН
76	37	25
$\frac{76}{152}$	$\frac{37}{74}$	$\frac{25}{50}$
$\frac{20}{172}$	$\frac{17}{91}$	$\frac{20}{70}$

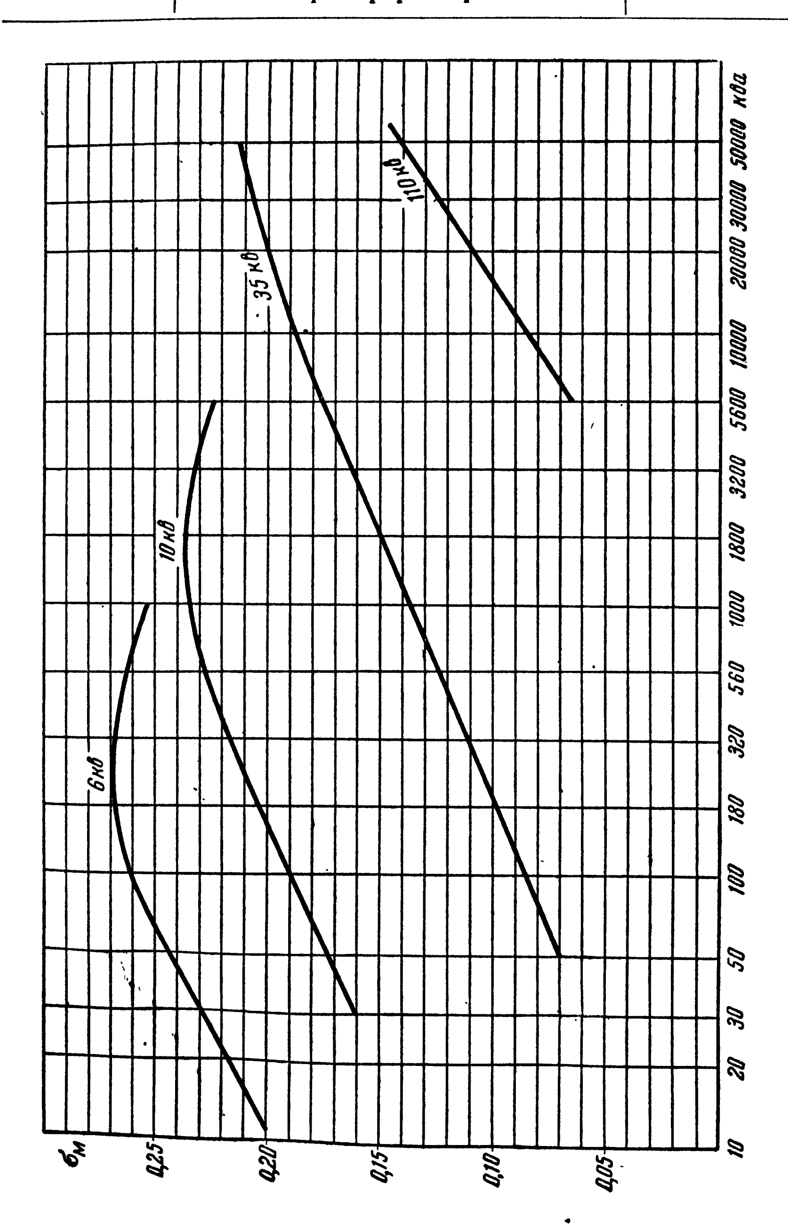
Превышения температур:

ВН $q=21{,}4\,\frac{17\cdot 79\cdot 4{,}44\cdot 1{,}015}{172\cdot 0{,}75}=1\,000$ *вт/м²*; $\tau=23°$ C

НН $q=21{,}4\,\frac{2\cdot 450\cdot 3{,}78\cdot 1{,}04}{91\cdot 0{,}75}=1\,120$ *вт/м²*; $\tau=25\cdot 1{,}1=27{,}5°$ C

СН $q=21{,}4\,\frac{5\cdot 150\cdot 4{,}49\cdot 1{,}01}{70\cdot 0{,}75}=1\,400$ *вт/м²*; $\tau=25\cdot 1{,}31=33°$ C

Справочные таблицы	$\sigma_м$ — коэффициенты заполнения окна для двух- и трехобмоточных трансформаторов	*Приложение I* лист 1



Справочные таблицы	**Таблицы для расчета абсолютных минимумов для однофазных трансформаторов $\varphi = 2$**	*Приложение II* лист 1

y	x	Заданы δ и B		Заданы $P_м$ и P_{cm}		$f_м$	f_{cm}
		в m	D^4/Q_0	в m	D/L_0		
0,00	0,00	∞	∞	—	∞	—	3,60
0,02	0,150	457	166	—	26	—	3,98
0,04	0,286	112	43,5	—	14	—	4,33
0,06	0,422	49,7	19,7	—	9,87	—	4,68
0,08	0,557	27,8	11,2	—	7,71	—	5,03
0,10	0,683	17,6	7,26	—	6,57	—	5,37
0,12	0,810	12,2	5,10	—	5,73	—	5,70
0,14	0,936	8,90	3,80	—	5,12	—	6,03
0,16	1,05	6,80	2,96	—	4,67	—	6,34
0,18	1,17	5,34	2,38	77	4,32	0,5	6,66
0,20	1,29	4,28	1,94	29,8	4,04	0,62	6,98
0,22	1,40	3,53	1,62	16,9	3,81	0,75	7,26
0,24	1,51	2,97	1,38	10,9	3,61	0,90	7,58
0,26	1,62	2,52	1,19	7,52	3,44	1,062	7,88
0,28	1,73	2,16	1,04	5,45	3,29	1,238	8,18
0,30	1,84	1,87	0,905	4,06	3,16	1,435	8,48
0,32	1,94	1,65	0,802	3,22	3,04	1,635	8,76
0,34	2,05	1,44	0,717	2,52	2,94	1,87	9,03
0,36	2,15	1,29	0,642	2,04	2,85	2,1	9,34
0,38	2,26	1,14	0,580	1,63	2,77	2,38	9,64
0,40	2,36	1,03	0,527	1,37	2,70	2,65	9,92
0,42	2,46	0,923	0,481	1,13	2,64	2,95	10,20
0,44	2,56	0,845	0,440	0,965	2,58	3,25	10,48
0,46	2,66	0,770	0,406	0,820	2,53	3,58	10,76
0,48	2,76	0,700	0,377	0,696	2,48	3,92	11,04
0,50	2,85	0,653	0,350	0,616	2,44	4,25	11,30
0,52	2,94	0,595	0,326	0,531	2,40	4,65	11,56
0,54	3,04	0,545	0,303	0,449	2,36	5,07	11,88
0,56	3,14	0,510	0,283	0,402	2,32	5,5	12,12
0,58	3,24	0,470	0,265	0,358	2,28	5,93	12,40
0,60	3,34	0,440	0,250	0,310	2,25	6,4	12,68

Справочные таблицы

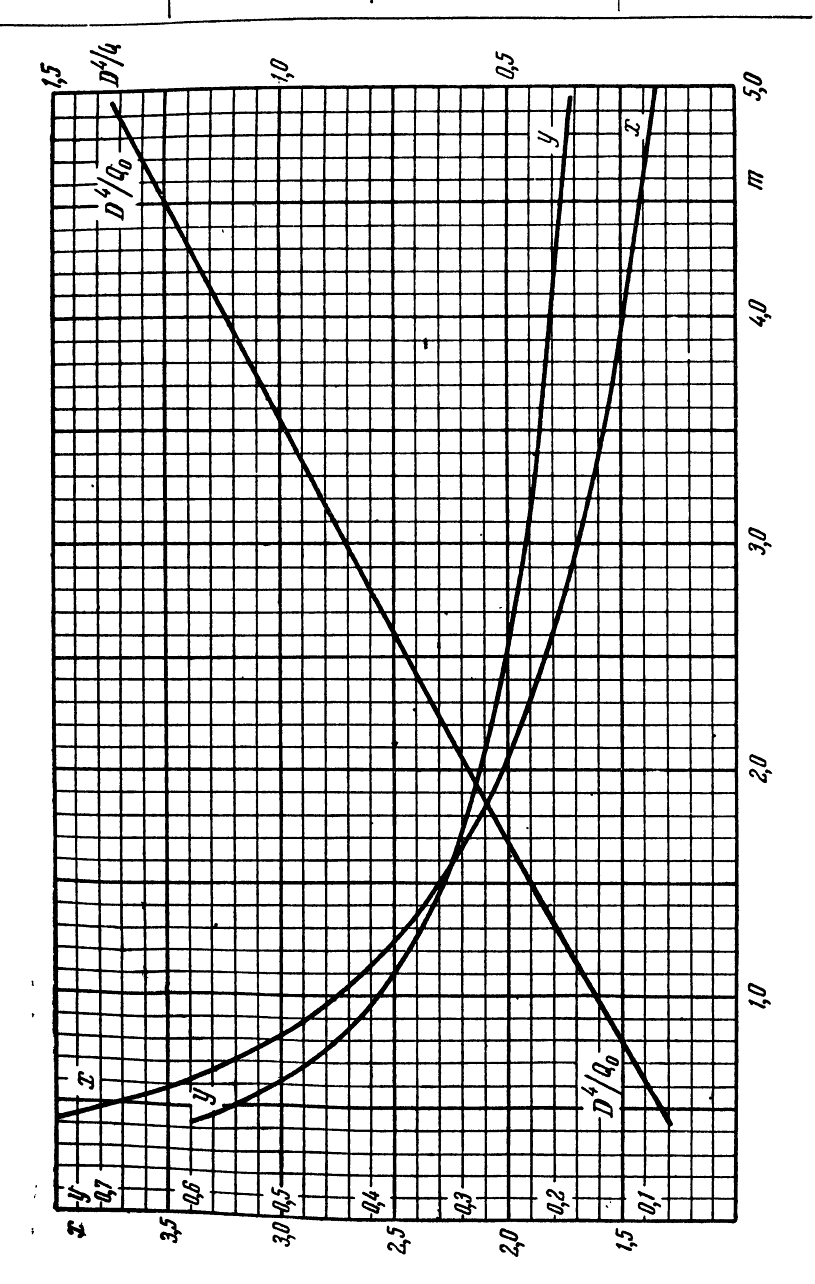
Таблицы для расчета четырех абсолютных минимумов (для трехфазных трансформаторов)

Приложение II лист 2

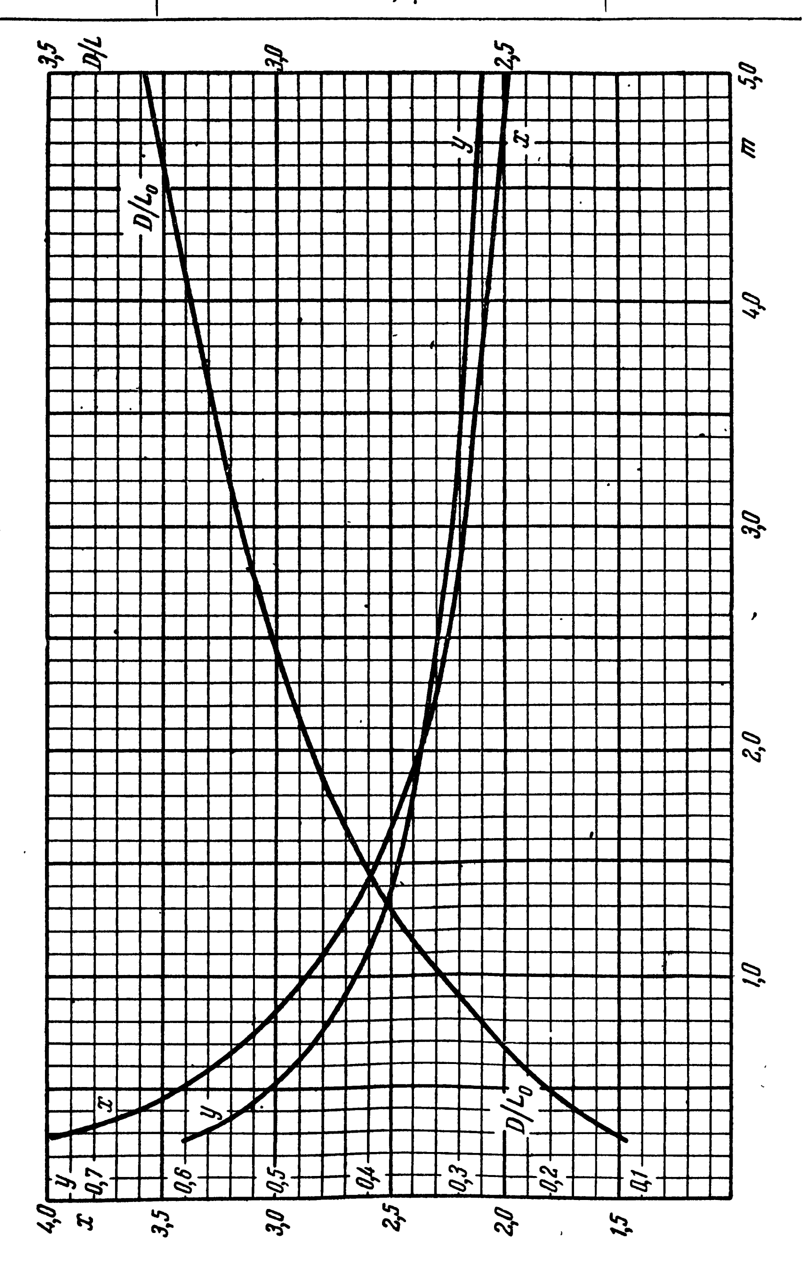
y	x	Заданы δ и B		Заданы $P_м$ и P_{cm}		Заданы δ и P_{cm}		Заданы $P_м$ и B		$f_м$	f_{cm}	Ψ_1
		m	D^4/Q_0	m	D/L_0	m	$D^{5/2}/M_1$	m	$D^{5/2}/M_2$			
0,00	0,00	∞	∞	—	∞	—	∞	∞	∞	0,000	5,6	—
0,02	0,163	374	102,2	—	25,5	—	256	181,45	10,21	0,0033	6,25	—
0,04	0,322	107,7	25,8	—	13,6	—	67,7	50,7	5,18	0,0134	6,89	—
0,06	0,478	46,2	11,63	—	9,62	—	31,9	21,4	3,51	0,0303	7,51	6 690
0,08	0,629	25,7	6,62	—	7,63	—	18,9	11,42	2,68	0,0543	8,13	3 590
0,10	0,778	16,45	4,29	—	6,42	—	12,58	7,1	2,18	0,0855	8,73	2 340
0,12	0,924	11,35	3,00	—	5,60	—	9,18	4,74	1,83	0,124	9,33	1 640
0,14	1,060	8,28	2,24	—	5,03	—	7,05	3,40	1,60	0,169	9,90	1 258
0,16	1,21	6,31	1,72	137,8	4,58	349	5,58	2,48	1,41	0,225	10,51	1 011
0,18	1,35	4,96	1,37	39,7	4,23	104	4,56	1,89	1,27	0,286	11,09	840
0,20	1,49	4,00	1,12	19,8	3,95	53,6	3,81	1,50	1,16	0,357	11,67	720
0,22	1,62	3,29	0,935	12,26	3,74	34,2	3,27	1,18	1,07	0,435	12,22	640
0,24	1,76	2,74	0,790	8,05	3,54	23,2	2,83	0,956	0,989	0,523	12,80	569

0,26	1,89	2,325	0,679	5,74	3,38	17,05	2,48	0,79	0,925	0,619	13,35	516
0,28	2,02	2,01	0,590	4,53	3,24	13,05	2,20	0,65	0,869	0,724	13,90	473
0,30	2,15	1,745	0,516	3,26	3,11	10,30	1,96	0,55	0,819	0,838	14,45	435
0,32	2,28	1,53	0,457	2,61	3,01	8,30	1,77	0,467	0,777	0,963	15,00	410
0,34	2,41	1,345	0,407	2,02	2,91	6,81	1,605	0,395	0,739	1,098	15,55	382
0,36	2,53	1,20	0,366	1,56	2,83	5,76	1,467	0,345	0,706	1,238	16,07	365
0,38	2,665	1,068	0,329	1,31	2,75	4,84	1,342	0,297	0,674	1,398	16,64	346
0,40	2,79	0,955	0,299	1,112	2,68	4,16	1,240	0,257	0,647	1,562	17,17	331
0,42	2,91	0,871	0,273	0,94	2,62	3,63	1,148	0,223	0,623	1,735	17,69	319
0,44	3,04	0,790	0,249	0,789	2,56	3,16	1,063	0,197	0,599	1,925	18,24	307
0,46	3,16	0,721	0,229	0,684	2,51	2,79	0,982	0,171	0,578	2,12	18,76	297
0,48	3,28	0,661	0,212	0,602	2,46	2,49	0,914	0,154	0,560	2,33	19,28	288
0,50	3,40	0,608	0,196	0,503	2,41	2,23	0,858	0,137	0,542	2,55	19,8	279
0,52	3,52	0,561	0,182	0,438	2,37	2,01	0,812	0,122	0,526	2,78	20,32	270
0,54	3,64	0,519	0,170	0,381	2,33	1,81	0,765	0,109	0,511	3,03	20,84	262
0,56	3,76	0,482	0,158	0,334	2,29	1,65	0,725	0,0975	0,497	3,285	21,36	256
0,58	3,88	0,447	0,148	0,293	2,26	1,51	0,692	0,0873	0,484	3,555	21,88	252
0,60	4,00	0,417	0,139	0,257	2,23	1,37	0,668	0,0781	0,462	3,84	22,4	249

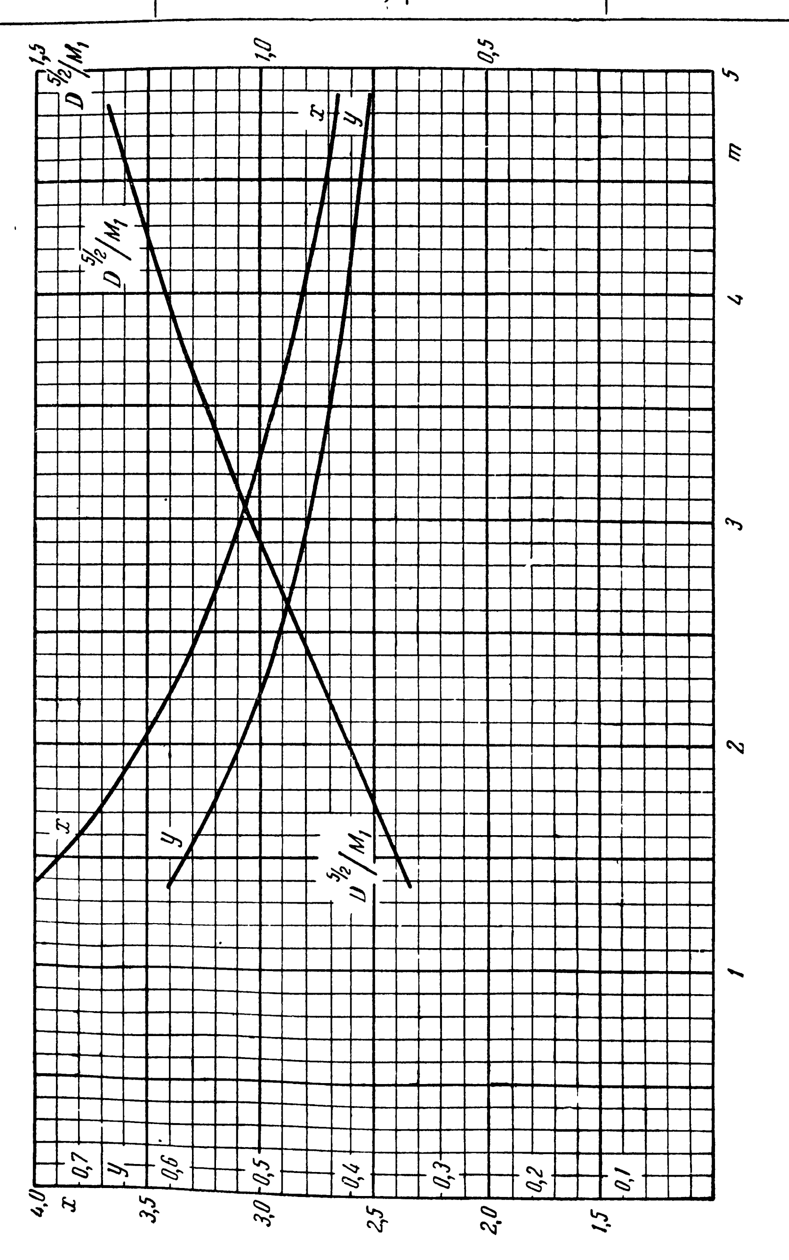
Справочные таблицы	Абсолютный минимум, когда заданы δ — плотность тока и B — индукция, φ=3	*Приложение II* лист 3



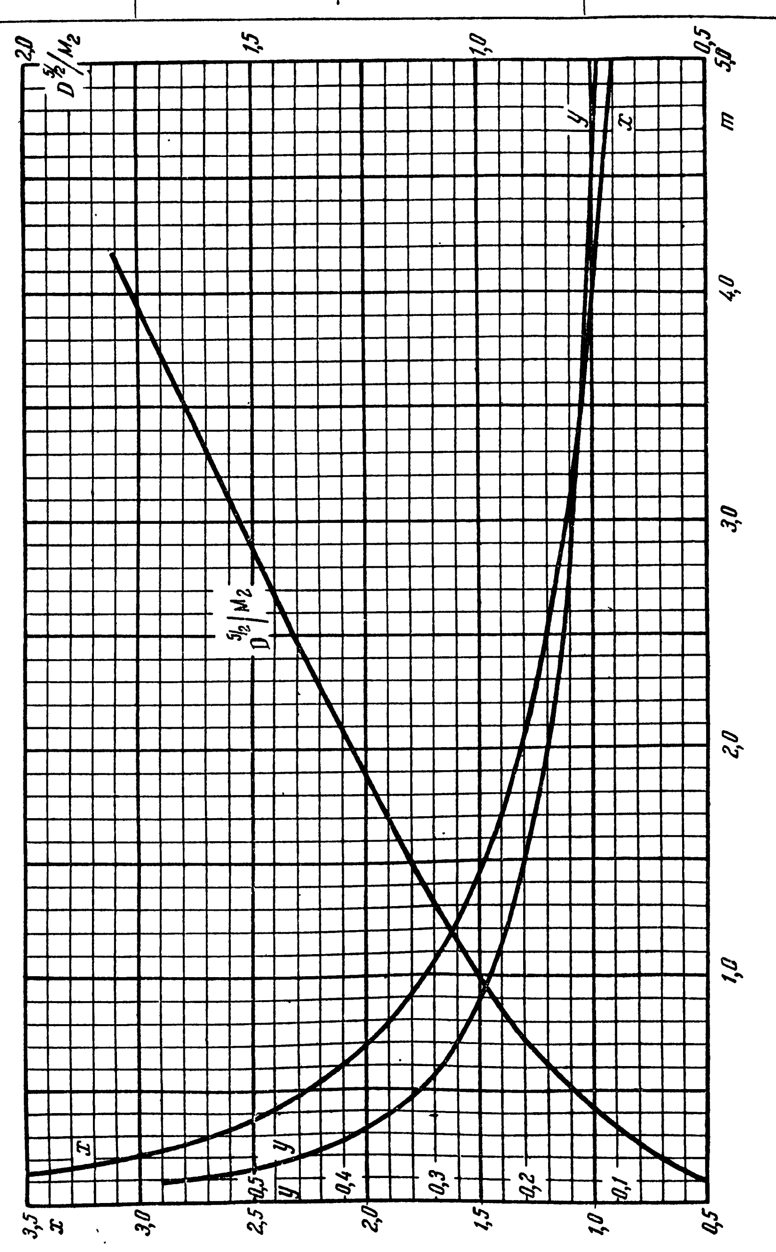
Справочные таблицы	Абсолютный минимум, когда заданы $P_м$ — потери в меди и $P_{ст}$ — потери в стали, $\varphi = 3$	*Приложение II* лист 4



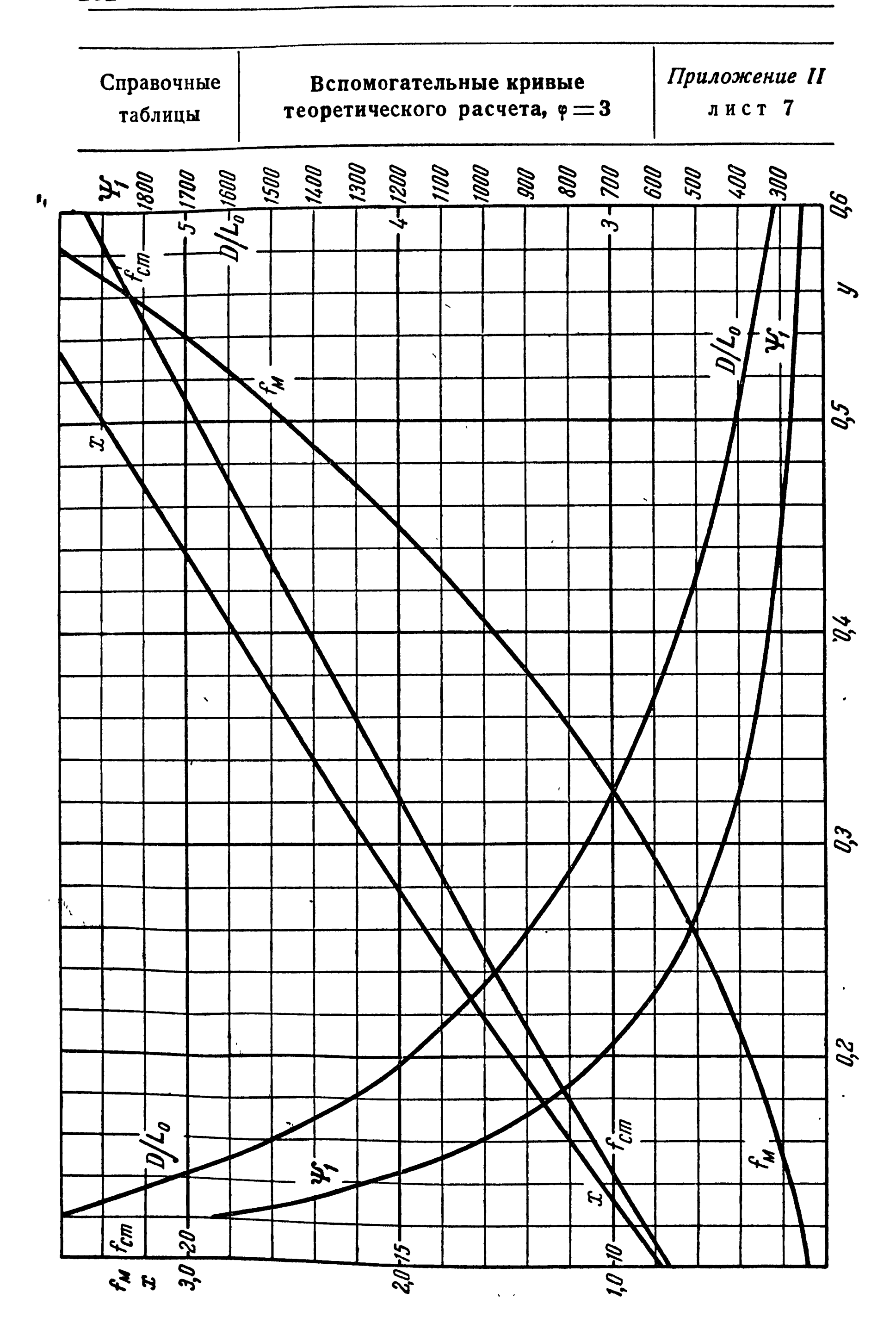
Справочные таблицы	Абсолютный минимум, когда заданы δ — плотность тока и P_{cm} — потери в стали, $\varphi = 3$	*Приложение II* лист 5



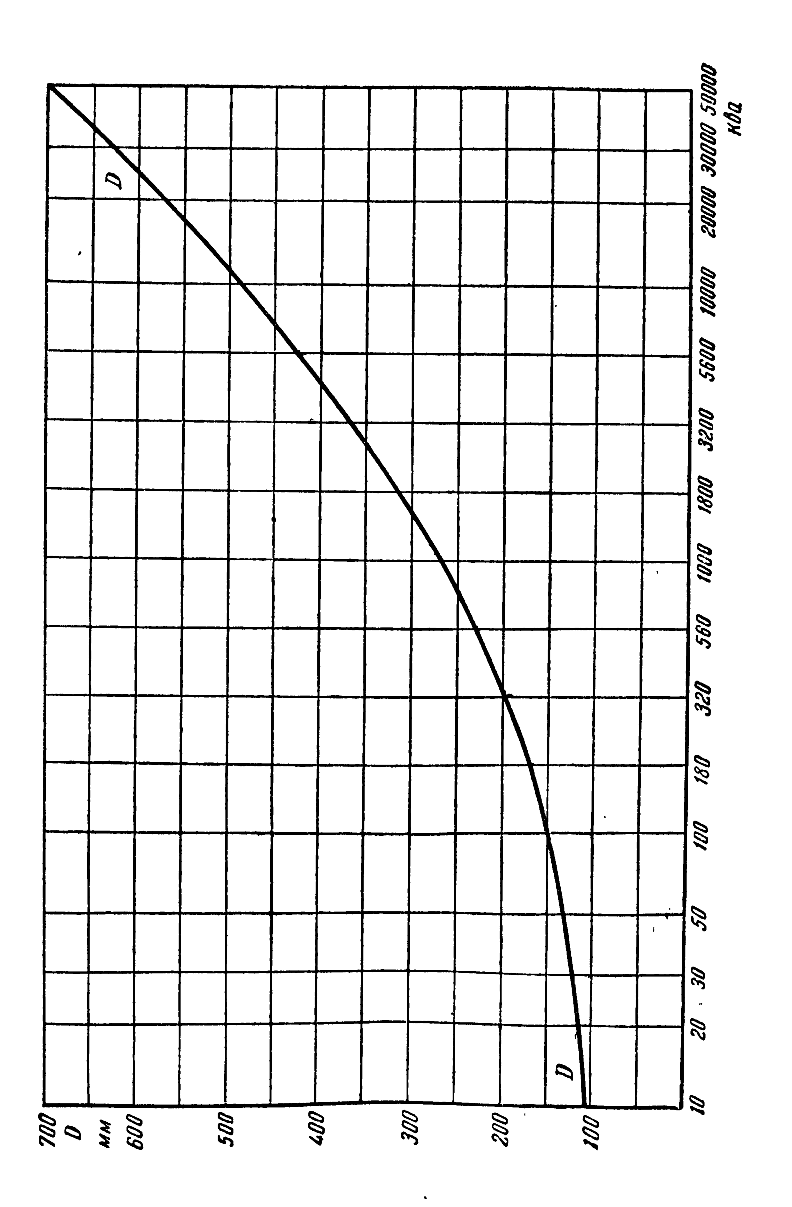
Справочные таблицы	Абсолютный минимум, когда заданы $P_м$ — потери в меди и B — индукция, $\varphi = 3$	*Приложение II* лист 6



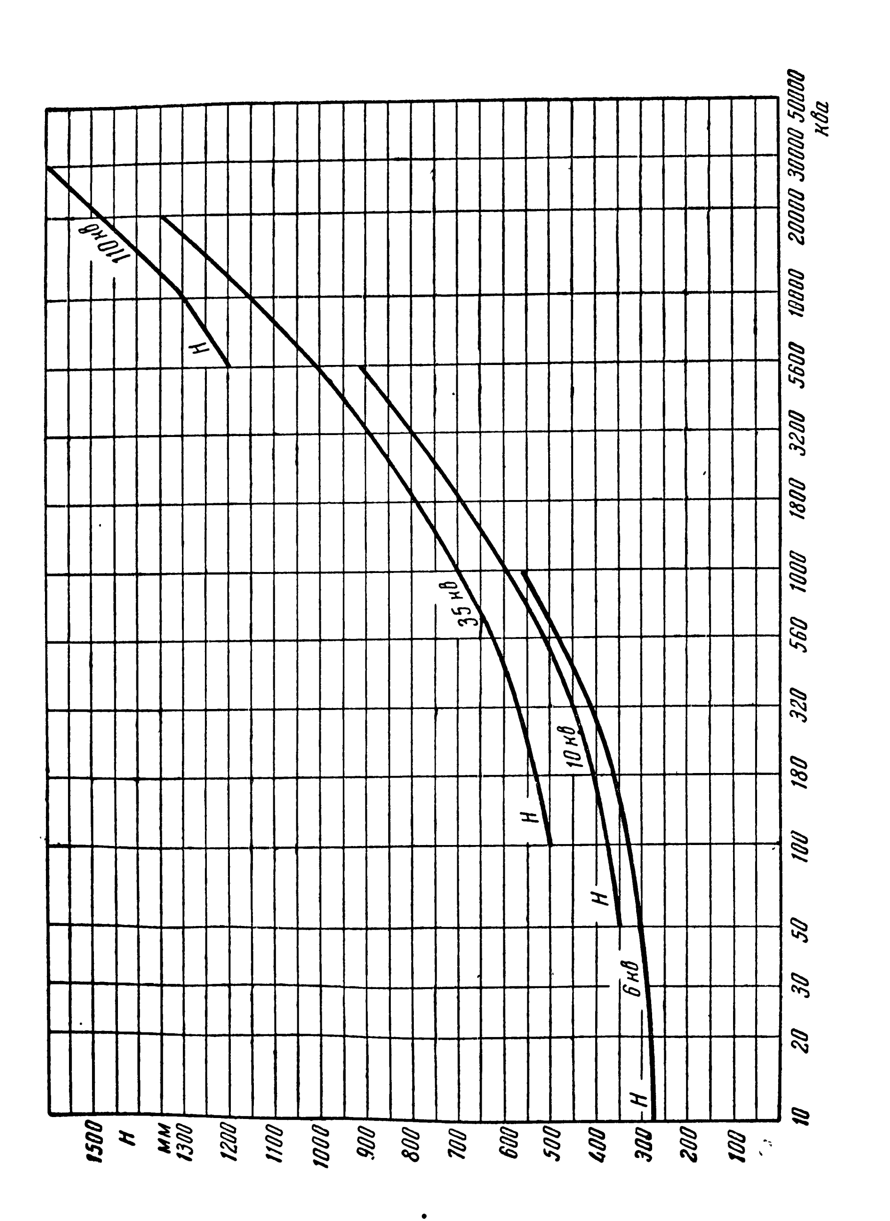
Справочные таблицы	Вспомогательные кривые теоретического расчета, $\varphi = 3$	*Приложение II* лист 7



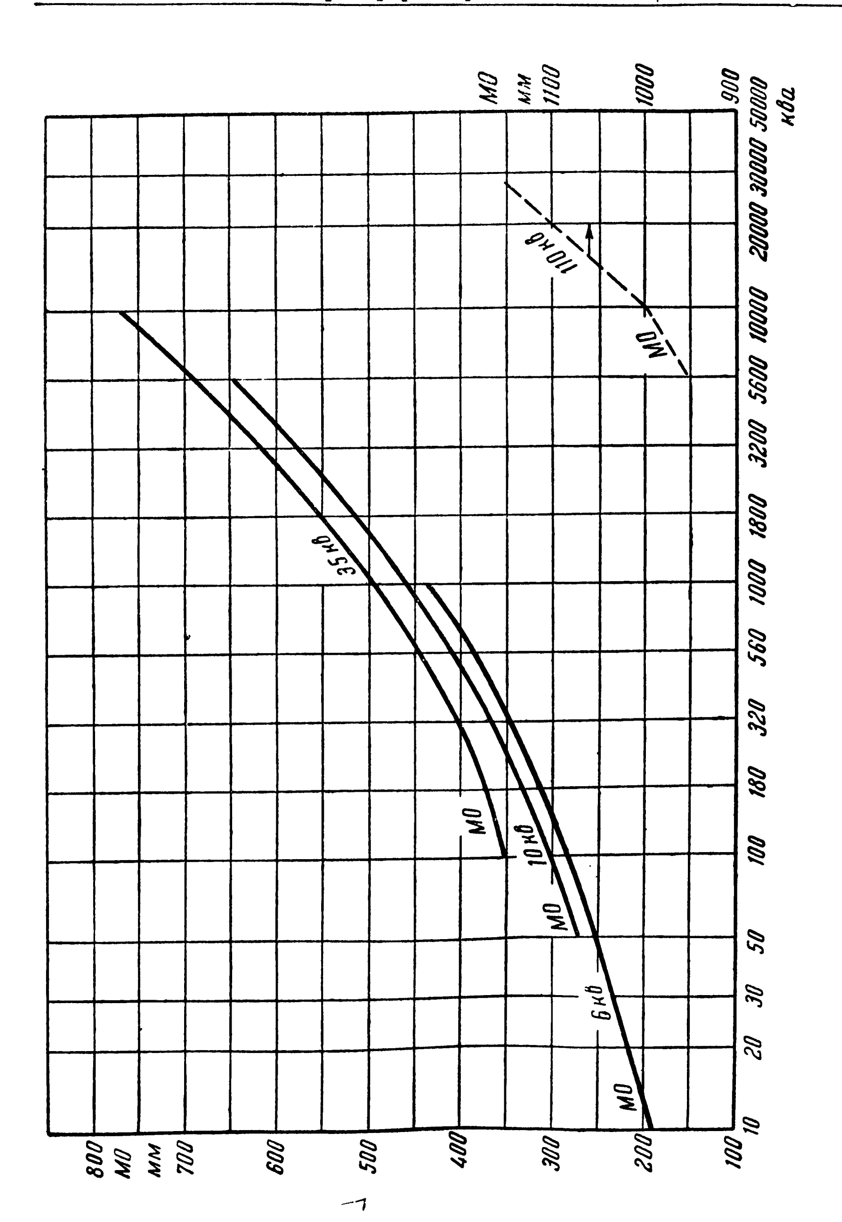
Справочные таблицы	**Приближенные расчеты** D — диаметры стержня в *мм* в функции от мощности трансформатора в *ква*	*Приложение III* лист 1



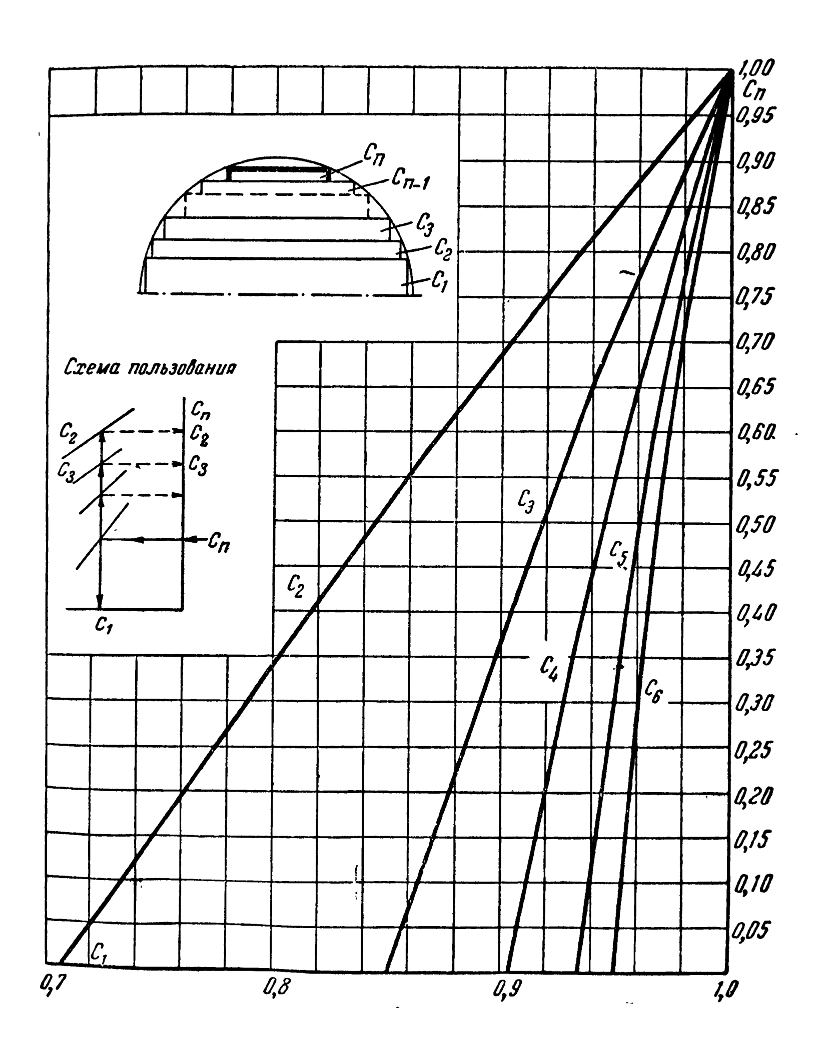
Справочные таблицы	**Приближенные расчеты** H — высота стержня (окна) в *мм* в функции от мощности трансформатора в *ква*	*Приложение III* лист 2



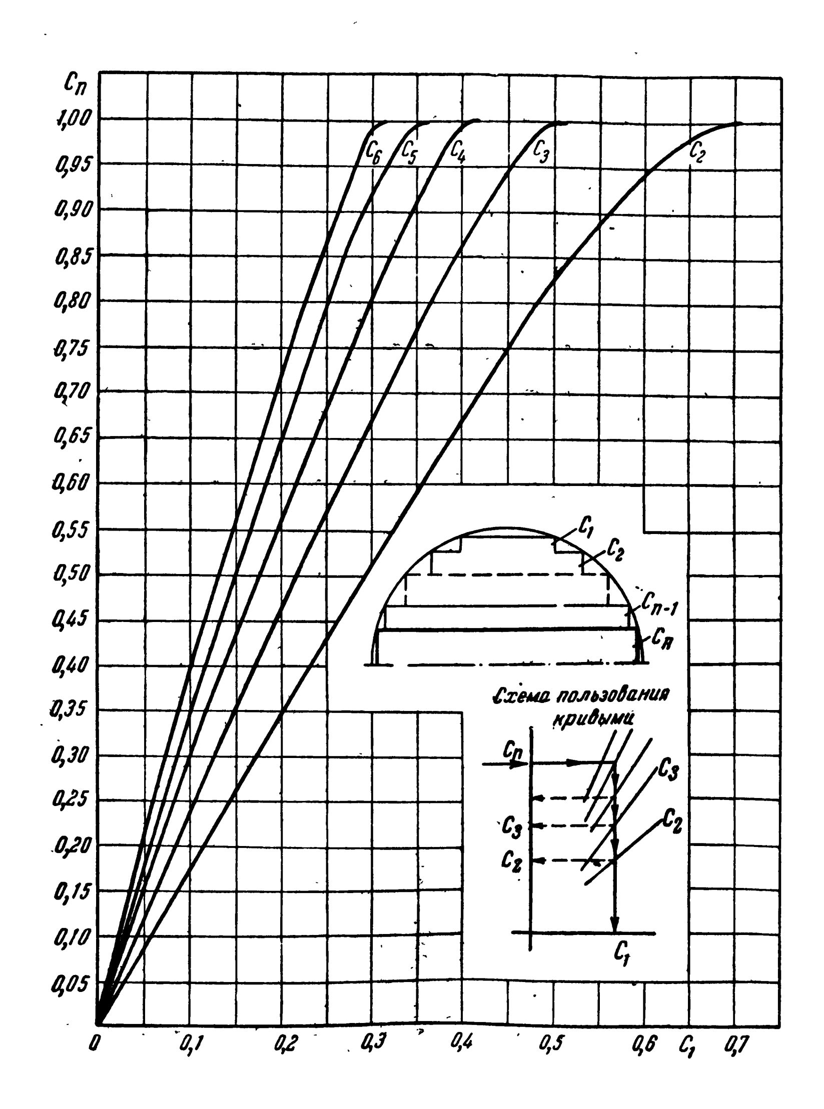
Справочные таблицы	**Приближенные расчеты** *МО* — расстояние между осями в *мм* в функции от мощности трансформатора в *ква*	*Приложение III* лист 3



Справочные таблицы	**Расчет максимального сечения стержня** Заданы размер наименьшей ступени C_n и число ступеней n	*Приложение IV* лист 1



Справочные таблицы	**Расчет максимального сечения стержня** Заданы размер наибольшей ступени C_n и число ступеней n	*Приложение IV* лист 2



Справочные таблицы

Таблица значений *H (ав/см)* и индукции *B (гс)* для трансформаторной стали Э4АА при намагничении постоянным током

Приложение V
лист 1

гс	*ав/см*	*гс*	*ав/см*	*гс*	*ав/см*	*гс*	*ав/см*	*гс*	*ав/см*	*гс*	*ав/см*	*гс*	*ав/см*	*гс*	*ав/см*	*гс*	*ав/см*
6 000	0,63	8 000	1,100	10 000	1,850	12 000	3,80	14 000	14,50	16 000	56,0	18 000	146,0	20 000	410	22 000	1 850
50	0,64	50	1,115	50	1,880	50	3,89	50	15,10	50	57,6	50	149,0	50	430	50	1 890
100	0,65	100	1,130	100	1,910	100	3,98	100	15,75	100	59,3	100	152,5	100	453	100	1 925
150	0,66	150	1,145	150	1,945	150	4,07	150	16,45	150	61,0	150	156,0	150	477	150	1 965
200	0,67	200	1,160	200	1,980	200	4,17	200	17,15	200	62,7	200	159,5	200	503	200	2 000
250	0,68	250	1,175	250	2,02	250	4,27	250	17,95	250	64,5	250	163,0	250	532	250	2 040
300	0,69	300	1,190	300	2,05	300	4,38	300	18,70	300	66,4	300	167,0	300	561	300	2 075
350	0,705	350	1,205	350	2,09	350	4,49	350	19,55	350	68,2	350	171,0	350	592	350	2 115
400	0,715	400	1,220	400	2,13	400	4,61	400	20,35	400	70,1	400	175,0	400	624	400	2 155
450	0,725	450	1,235	450	2,16	450	4,75	450	21,2	450	72,1	450	179,0	450	657	450	2 190
6 500	0,735	8 500	1,250	10 500	2,20	12 500	4,90	14 500	22,0	16 500	74,0	18 500	183,0	20 500	690	22 500	2 230
550	0,746	550	1,265	550	2,24	550	5,05	550	22,8	550	75,9	550	187,0	550	724	550	2 270
600	0,756	600	1,280	600	2,27	600	5,20	600	23,7	600	77,9	600	191,5	600	760	600	2 310
650	0,766	650	1,295	650	2,31	650	5,36	650	24,5	650	79,9	650	195,5	650	798	650	2 350
700	0,776	700	1,305	700	2,35	700	5,52	700	25,4	700	82,0	700	200	700	837	700	2 390
750	0,786	750	1,320	750	2,39	750	5,70	750	26,3	750	84,1	750	205	750	878	750	2 430
800	0,797	800	1,335	800	2,43	800	5,88	800	27,2	800	86,2	800	210	800	919	800	2 470
850	0,807	850	1,350	850	2,47	850	6,08	850	28,1	850	88,4	850	214	850	960	850	2 510
900	0,818	900	1,365	900	2,51	900	6,30	900	29,0	900	90,6	900	219	900	1 000	900	2 550
950	0,829	950	1,385	950	2,56	950	6,54	950	30,0	950	92,8	950	225	950	1 040	950	2 590

7000	0,840	9 000	1,400	11 000	2,60	13 000	6,80	15 000	31,0	17 000	95,0	19 000	230	21 000	1 080	23 000	2 630
50	0,851	50	1,415	50	2,65	50	7,06	50	32,0	50	97,2	50	235	50	1 115	50	2 670
100	0,863	100	1,435	100	2,69	100	7,32	100	33,0	100	99,5	100	240	100	1 155	100	2 710
150	0,875	150	1,450	150	2,74	150	7,61	150	34,0	150	102,0	150	245	150	1 195	150	2 750
200	0,886	200	1,470	200	2,78	200	7,91	200	35,1	200	104,0	200	250	200	1 230	200	2 790
250	0,898	250	1,490	250	2,83	250	8,22	250	36,2	250	106,5	250	255	250	1 270	250	2 830
300	0,910	300	1,510	300	2,88	300	8,55	300	37,3	300	109,0	300	260	300	1 305	300	2 870
350	0,922	350	1,535	350	2,93	350	8,89	350	38,4	350	111,5	350	266	350	1 345	350	2 910
400	0,935	400	1,555	400	2,98	400	9,24	400	39,6	400	114,0	400	273	400	1 385	400	2 950
450	0,947	450	1,580	450	3,04	450	9,62	450	40,8	450	116,5	450	281	450	1 420	450	2 990
7 500	0,96	9 500	1,600	11 500	3,10	13 500	10,00	15 500	42,0	17 500	119,0	19 500	290	21 500	1 460	23 500	3 030
550	0,973	550	1,625	550	3,16	550	10,38	550	43,3	550	121,5	550	299	550	1 500	550	3 070
600	0,986	600	1,645	600	3,22	600	10,77	600	44,6	600	124,0	600	308	600	1 535	600	3 110
650	0,999	650	1,665	650	3,28	650	11,15	650	45,9	650	126,5	650	316	650	1 570	650	3 150
700	1,015	700	1,690	700	3,34	700	11,55	700	47,1	700	129,0	700	325	700	1 610	700	3 190
750	1,025	750	1,715	750	3,41	750	11,95	750	48,5	750	131,5	750	335	750	1 655	750	3 230
800	1,040	800	1,740	800	3,48	800	12,40	800	49,9	800	134,0	800	346	800	1 695	800	3 270
850	1,055	850	1,765	850	3,55	850	12,85	850	51,4	850	137,0	850	358	850	1 735	850	3 310
900	1,070	900	1,790	900	3,63	900	13,35	900	52,9	900	140,0	900	373	900	1 770	900	3 350
950	1,085	950	1,820	950	3,71	950	13,90	950	54,4	950	143,0	950	390	950	1 810	950	3 390
8 000	1,100	10 000	1,850	12 000	3,80	14 000	14,50	16 000	56,0	18 000	146,0	20 000	410	22 000	1 850	24 000	3 430

Справочные таблицы	**Трансформаторная сталь Удельные потери и удельная намагничивающая мощность**	*Приложение V* лист 2

B в *гс*	k_{cm} — потери в *вт/кг*		k_{μ} в *ва/кг*	*B* в *гс*	k_{cm} — потери в *вт/кг*		k_{μ} в *ва/кг*	*B* в *гс*	k_{cm} — потери в *вт/кг*		k_{μ} в *ва/кг*
	0,35	0,5			0,35	0,5			0,35	0,5	
6 000	—	—	0,80	9 000	1,07	1,32	2,88	12 000	1,91	2,30	10,6
6 100	—	—	0,84	9 100	1,09	1,34	3,00	12 100	1,94	2,35	11,1
6 200	—	—	0,88	9 200	1,11	1,36	3,13	12 200	1,98	2,39	11,6
6 300	—	—	0,92	9 300	1,13	1,39	3,26	12 300	2,02	2,43	12,1
6 400	—	—	0,96	9 400	1,16	1,42	3,40	12 400	2,06	2,47	12,6
6 500	—	—	1,00	9 500	1,18	1,45	3,55	12 500	2,10	2,51	13,2
6 600	—	—	1,04	9 600	1,20	1,48	3,70	12 600	2,14	2,56	13,8
6 700	—	—	1,09	9 700	1,23	1,51	3,86	12 700	2,17	2,60	14,4
6 800	—	—	1,14	9 800	1,25	1,54	4,03	12 800	2,22	2,64	15,1
6 900	—	—	1,19	9 900	1,28	1,57	4,21	12 900	2,27	2,69	15,8
7 000	0,695	0,88	1,25	10 000	1,30	1,60	4,40	13 000	2,31	2,73	16,6
7 100	0,715	0,90	1,30	10 100	1,33	1,64	4,60	13 100	2,35	2,77	17,4
7 200	0,730	0,92	1,35	10 200	1,35	1,67	4,80	13 200	2,40	2,82	18,2
7 300	0,745	0,94	1,41	10 300	1,38	1,70	5,01	13 300	2,45	2,86	19,1
7 400	0,760	0,96	1,47	10 400	1,41	1,74	5,22	13 400	2,50	2,20	20,1
7 500	0,780	0,99	1,54	10 500	1,44	1,77	5,44	13 500	2,55	2,95	21,1
7 600	0,795	1,01	1,61	10 600	1,46	1,80	5,66	13 600	2,60	3,00	22,1
7 700	0,81	1,03	1,68	10 700	1,49	1,83	5,90	13 700	2,64	3,06	23,1
7 800	0,83	1,06	1,75	10 800	1,52	1,86	6,16	13 800	2,69	3,12	24,2
7 900	0,85	1,08	1,82	10 900	1,55	1,89	6,44	13 900	2,74	3,18	25,4
8 000	0,87	1,10	1,90	11 000	1,58	1,93	6,74	14 000	2,80	3,25	26,8
8 100	0,89	1,12	1,98	11 100	1,61	1,96	7,05	14 100	2,86	3,31	28,2
8 200	0,91	1,14	2,06	11 200	1,64	2,00	7,37	14 200	2,92	3,37	29,8
8 300	0,93	1,16	2,15	11 300	1,67	2,04	7,69	14 300	2,99	3,43	31,4
8 400	0,95	1,18	2,24	11 400	1,70	2,07	8,03	14 400	3,06	3,50	33,0
8 500	0,97	1,20	2,34	11 500	1,73	2,10	8,39	14 500	3,13	3,57	34,8
8 600	0,99	1,22	2,44	11 600	1,76	2,14	8,77	14 600	3,20	3,65	36,6
8 700	1,01	1,25	2,55	11 700	1,80	2,18	9,18	14 700	3,27	3,73	38,4
8 800	1,03	1,27	2,65	11 800	1,83	2,22	9,63	14 800	3,34	3,82	40,2
9 900	1,05	1,29	2,76	11 900	1,87	2,26	10,1	14 900	3,42	3,91	42
9 000	1,07	1,32	2,88	12 000	1,91	2,30	10,6	15 000	3,5	4,00	44

Поправочные коэффициенты для расчета намагничивающей мощности P_{10}

Диаметр сердечника в *мм*	300 и более	250	200	150	100	50
Поправочный коэффициент	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

Справочные таблицы	Обмоточные провода Круглые провода						Приложение VI лист 1	
Диаметр голого провода в мм	**Сечение провода в мм²**	**Толщина изоляции (на обе стороны) в мм**	**Диаметр голого провода в мм**	**Сечение провода в мм²**	**Толщина изоляции (на обе стороны) в мм**	**Диаметр голого провода в мм²**	**Сечение провода в мм²**	**Толщина изоляции (на обе стороны) в мм**
0,2	0,0314		0,93	0,679		1,68	2,217	
0,23	0,0415	0,14	0,96	0,724		1,74	2,378	
0,27	0,0573		1,00	0,785		1,81	2,573	
0,31	0,0755	0,2	1,04	0,849	0,3	1,88	2,776	
0,35	0,0962		1,08	0,916		1,95	2,986	
0,41	0,1320		1,12	0,985		2,02	3,205	
0,47	0,1735		1,16	1,057		2,10	3,464	
0,51	0,2043		1,20	1,131		2,26	4,012	0,4
0,55	0,2376	0,25	1,25	1,227		2,44	4,676	
0,59	0,2734		1,30	1,327		2,63	5,433	
0,64	0,3217		1,35	1,431		2,83	6,290	
0,69	0,3739		1,40	1,539	0,4	3,05	7,306	
0,74	0,4301		1,45	1,651		3,28	8,450	
0,80	0,5027		1,50	1,767		3,53	9,787	
0,86	0,5809	0,3	1,56	1,911		3,8	11,34	
0,90	0,6362		1,62	2,061		4,1	13,20	

Толщина изоляции указана „на обе стороны", например, голый провод ⌀ 0,86 с изоляцией будет иметь ⌀ 1,16 *мм*.

Род изоляции — эмаль + два ряда хлопчатобумажной пряжи для проводов до ⌀ 1,16,

— кабельная бумага + хлопчатобумажная пряжа с „разгоном" от ⌀ 1,2 до ⌀ 4,1.

Справочные таблицы	Обмоточные провода Провода прямоугольного сечения															Приложение VI лист 2
Размеры проводов в *мм*	Сечение проводов в *мм*²															
	1,00	1,16	1,35	1,56	1,68	1,81	1,95	2,1	2,26	2,44	2,63	2,83	3,28	3,8	4,4	5,1
3,28	3,07	3,60	4,22	4,91	5,30	5,73	6,19	6,41	—	—	—	—	—	—	—	—
3,8	3,59	4,20	4,92	5,72	6,17	6,67	7,20	7,50	8,11	8,79	—	—	—	—	—	—
4,1	3,89	4,55	5,33	6,19	6,68	7,21	7,79	8,13	8,79	9,52	10,3	—	—	—	—	—
4,4	4,19	4,89	5,73	6,65	7,18	7,75	8,37	8,76	9,46	10,2	11,1	12,0	—	—	—	—
4,7	—	5,24	6,14	7,12	7,79	8,30	8,96	9,39	10,1	11,0	11,9	12,8	—	—	—	—
5,1	—	5,71	6,68	7,75	8,36	9,02	9,74	10,2	11,0	11,9	12,9	13,9	16,2	—	—	—
5,5	—	—	7,22	8,37	9,03	9,75	10,5	11,1	11,9	12,9	14,6	15,1	17,5	—	—	—
5,9	—	—	7,76	8,99	9,70	10,5	11,3	11,9	12,8	13,9	15,0	16,2	18,9	21,9	—	—
6,4	—	—	—	9,77	10,6	11,4	12,3	12,9	14,0	15,1	16,3	17,6	20,5	23,8	—	—
6,9	—	—	—	—	11,4	12,3	13,3	14,0	15,1	16,3	17,7	19,0	22,1	25,7	29,5	—
7,4	—	—	—	—	—	13,3	14,2	15,0	16,2	17,6	19,0	20,4	23,6	27,6	31,7	—
8,0	—	—	—	—	—	—	15,4	16,3	17,6	19,0	20,5	22,1	25,7	29,9	34,3	39,9
8,6	—	—	—	—	—	—	—	17,6	18,9	20,5	22,1	23,8	27,7	32,2	36,9	43,0
9,3	—	—	—	—	—	—	—	—	20,5	22,2	24,0	25,8	30,0	34,8	40,0	46,5
10,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23,9	25,8	27,8	32,3	37,5	43,1	50,1
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27,9	30,1	34,9	40,5	46,6	54,2
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40,5	47,0	54,1	62,9
Изоляция	0,4				0,5											

Толщина изоляции указана для обеих сторон провода: например, провод 8 × 2,1 с изоляцией будет иметь размер 8,5 × 2,6. Род изоляции: кабельная бумага + хлопчатобумажная пряжа с „разгоном“.

Справочные таблицы	Изоляционные материалы	*Приложение VII* лист 1

Воздух

Пробивочное напряжение $U_{пр}$ (в *кв*) между шарами при давлении 760 *мм* рт. ст. и температуре 20° С.

Один шар заземлен. Напряжение приложено ко второму шару.

Графа 1 для $U_{пр}$ — амплитудное при 50 *гц*;
для $U_{пр}$ — максимальное при отрицательных импульсах;
для $U_{пр}$ — постоянное напряжение отрицательной полярности (ГОСТ 1232-41);

Графа 2 для $U_{пр}$ — максимальное при положительных импульсах;
для $U_{пр}$ — постоянное напряжение положительной полярности.

Графа	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Расстояние между шарами в *мм*	Пробивное напряжение для шаров диаметром														
	20 *мм*	50 *мм*		100 *мм*		150 *мм*		250 *мм*		500 *мм*		750 *мм*		1 000 *мм*	
0,5	2,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,0	4,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,5	6,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,0	8,2	8,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	11,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	14,8	14,3	14,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	18,0	—	—	16,9	16,9	16,5	16,5	—	—	—	—	—	—	—	—
6	21,0	20,4	20,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	26,6	26,3	26,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	31,2	32,0	32,0	31,6	31,6	31,3	31,3	31	31	—	—	—	—	—	—
12	35,1	37,6	37,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	38,5	43,0	43,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	45,6	45,6	45,5	45,5	45	—	—	—	—	—	—	—
16	—	48,1	49,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	—	53,0	54,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	57,4	59,4	59,1	59,1	59,2	59,2	59	59	58	58	58	58	—	—
25	—	67,2	71,0	72,0	72,8	72,6	72,6	72	—	—	—	—	—	—	—
30	—	75,4	81,1	84,1	85,6	85,5	85,6	86	86	—	—	—	—	—	—
35	—	82,4	90,0	95,2	97,4	98,1	98,7	—	—	—	—	—	—	—	—
40	—	—	97,5	105	109	110	111	112	112	112	112	112	112	—	—
50	—	—	109	123	130	132	136	137	138	—	—	—	—	137	137
60	—	—	—	138	148	152	158	161	162	164	164	164	164	—	—
70	—	—	—	150	163	169	178	184	187	—	—	—	—	—	—
80	—	—	—	—	176	185	196	205	210	214	214	215	215	—	—
100	—	—	—	—	195	209	226	243	252	262	262	265	265	266	266
120	—	—	—	—	—	—	249	—	290	308	310	313	313	—	—
140	—	—	—	—	—	—	2[illegible]9	—	321	352	356	360	360	—	—
150	—	—	—	—	—	—	—	—	335	—	—	—	—	387	388
160	—	—	—	—	—	—	—	—	348	392	401	406	407	—	—
180	—	—	—	—	—	—	—	—	372	428	440	450	452	—	—
200	—	—	—	—	—	—	—	—	393	461	478	492	499	503	503
240	—	—	—	—	—	—	—	—	424	520	543	570	582	—	—
250	—	—	—	—	—	—	—	—	430	—	—	—	—	611	616
280	—	—	—	—	—	—	—	—	—	570	600	640	659	—	—
300	—	—	—	—	—	—	—	—	—	591	625	670	694	709	719

При давлении *p мм* рт. ст. и температуре ϑ в °С отличных от указанных выше, пробивные напряжения следует умножить на коэффициент

$$к = \frac{0{,}386p}{273 + \vartheta}$$

Справочные таблицы	Изоляционные материалы	Приложение VII лист 2

Воздух (продолжение)

Пробивное напряжение $U_{пр}$ в *кв* между стержнями при давлении 760 *мм* рт. ст. и температуре 20° С

Один стержень заземлен

Графа 1 для $U_{пр}$ — действующее значение при 50 *гц*;
» 2 для $U_{пр}$ — максимальное при полной волне 1,5/40 *мксек*; отрицательный импульс;
Графа 3 для $U_{пр}$ — то же для положительного импульса;
» 4 для $U_{пр}$ — действующее значение при 50 *гц* для электродов игла—игла.

Фиг. ПVII-1.

Расстояние *s* в *мм*	20	40	60	80	100	150	200	250	300	400	500	600	800	1 000	1 200	1 500
Графа 1	19	33,5	45	53	58,5	73,5	88,5	101,5	118	160	195	230	303	375	445	555
Графа 2	33	53	71	88	103	140	180	220	260	340	405	470	585	705	825	1 000
Графа 3	33	52	67	81	94	125	153	187	223	290	350	405	515	625	735	900
Графа 4	17	29	39	47	54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Диэлектрическая проницаемость (относительная) различных материалов (ε)

Материал	ε	Материал	ε
Асфальт	2,5	Керосин	2,0—2,3
Бакелит	4,5	Лакоткань	4,5—5,5
Гетинакс листовой при 25° C	3,7	Масло трансформаторное	2,0—2,5
» » » 50° C	3,85	Масло льняное	3,5
» » » 75° C	4,4	Парафин	1,9—2,3
» » » 100° C	5,0	Сера	4—3
Бумага сухая	1,8—2,6	Слюда	5—7
» парафинированная	3,5	Стекло	7—8
» промасленная	4	Фарфор	4,5—5
Воздух	1	Фибра сухая	2,5
Гуттаперча	2,8—4,5	» промасленная	4,5—5
Дерево	3,0—3,5	Шеллак	3
Канифоль	2,5	Эбонит	2—3
Каучук	2,5—3,0	Электрокартон	3
		» промасленный	4—5

Формулы для емкости

1. Плоский конденсатор F — площадь в $см^2$;
l — расстояние между пластинами в *см*

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{F}{l} \text{ (ф)}$$

2. Концентрические цилиндры R — внешний радиус в *см*
r — внутренний радиус в *см*

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}{ln \frac{R}{r}} \text{ (ф на 1 см длины цилиндров)}$$

Здесь ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon_0 = \frac{10^9}{4\pi 9 \cdot 10^{20}} = 8,84 \cdot 10^{-14} \text{ (ф/см)}$$

Справочные таблицы	**Изоляционные материалы**	*Приложение VII* лист 3

Трансформаторное масло

Пробивное напряжение при 50 *гц* и при импульсах для масла с пробивным напряжением 15÷30 $кв_{действ}$ в стандартном разряднике (2,5 *мм*) и при температуре 15—20° С.

$U_{действ}$ — действующее значение напряжения при 50 *гц* в *кв*.
Методика испытания — одноминутная, ступенчатая непрерывная.

$U_{имп}$ — амплитуда импульса в *кв* для волны 1,5/40 *мксек*.
Методика испытаний — средние значения для единичных пробоев (т. е. амплитуда волны, при которой из пяти импульсов хотя бы один вызывает пробой).

(—)— отрицательный импульс, (+) — положительный импульс.

Игла—игла, *s* — расстояние в *мм*. Второй электрод заземлен

s в *мм*	10	20	30	40	50	60	80	100	150	200	250	300	350	400
$U_{действ}$ в *кв*	24	41	56	71	84	97	118	137	182	222	262	298	334	366
$U_{имп}$ (—) в *кв*	65	108	140	160	180	200	258	315	405	475	—	—	—	—
$U_{имп}$ (+) в *кв*	48	85	113	135	165	192	267	320	422	495	—	—	—	—

Игла—плоскость, *s* — расстояние в *мм*. Второй электрод заземлен

s в *мм*	10	20	30	40	50	60	80	100	150	200	250	300	350	400
$U_{действ}$ в *кв*	14	26	38	48	58	68	87	105	145	180	212	242	270	295
$U_{имп}$ (—) в *кв*	—	67	97	125	165	205	265	305	405	495	570	640	700	750
$U_{имп}$ (+) в *кв*	—	45	70	95	127	167	245	280	367	445	500	545	595	680

Шар—плоскость, *s* — расстояние в *мм*, *D* — диаметр шара в *мм*
$U_{действ}$ — действующее значение напряжения при 50 *гц* в *кв*

s в *мм*	20	40	60	80	100	150	200	250	300	350	400
D = 50 *мм*	53	94	122	142	158	193	217	246	268	290	310
D = 150 *мм*	54	107	145	174	194	250	288	325	354	374	393
D = 250 *мм*	84	149	190	214	240	288	323	358	—	—	—
D = 500 *мм*	84	149	190	230	263	338	—	—	—	—	—

$U_{имп}$ — амплитуда импульса в *кв* для волны (—) 1,5/40 *мксек*

s в *мм*	20	40	60	80	100	150	200
D = 10 *мм*	252	300	335	360	—	—	—
D = 50 *мм*	440	600	670	730	765	805	840
D = 150 *мм*	485	770	1 010	1 180	1 300	—	—
D = 250 *мм*	495	820	1 080	1 325	1 530	—	—
D = 500 *мм*	505	820	1 110	1 380	—	—	—

Справочные таблицы	**Изоляционные материалы**	*Приложение VII* лист 4

Электрокартон марок ЭМ и ЭВТ

Пробивное напряжение при 50 *гц* и при импульсах для плоских электродов ⌀ 50 и ⌀ 100 *мм* при температуре 75°С

$U_{действ}$ — минимальное действующее значение напряжения при 50 *гц* в *кв*; методика испытания — одноминутная, ступенчатая непрерывная;

$U_{имп}$ — амплитуда импульса в *кв* для волны 1,5/40 *мксек*; методика испытания малоударная.

(—) — отрицательный импульс, (+) — положительный импульс.

Обработка образцов — вакуумная сушка, пропитка под вакуумом, дополнительный вакуум перед испытанием.

В масле при $t = 75$°С

Толщина образца в *мм*	0,2	0,3	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$U_{действ}$ ЭМ в *кв*	9,7	12,8	17,9	24,5	28	31,2	33,7	36	38,2	40,2
$U_{действ}$ ЭВТ в *кв*	12	15,4	19,4	29,1	30,8	34	37	39,5	42	44,5
$U_{имп}(\pm)$ ЭМ в *кв*	—	—	42	65	78	91	102	114	123	134
$U_{имп}(\pm)$ ЭВТ в *кв*	—	—	48	71	87	100	113	124	134	144

Обработка образцов — сушка в воздухе

В воздухе при $t = 25$°С

Толщина образца в *мм*	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$U_{действ}$ ЭМ и ЭВТ в *кв*	5,5	9,3	13,2	16,2	18,8	21	23	25

Напряжение возникновения скользящих разрядов при 50 *гц* для плоских электродов ⌀ 50 и ⌀ 100 *мм* при температуре 75°С в масле

Толщина образца в *мм*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15
$U_{действ}$ ЭМ и ЭВТ в *кв*	19	25,5	30,3	34	37,5	40,5	43,3	46	48,2	50,7	54,5	60,5

Гетинакс (цилиндры и трубки)

Пробивное напряжение при 50 *гц* и при импульсах для электродов в виде металлических обкладок: для цилиндров — снаружи и изнутри, для трубок — снаружи, а внутри металлический стержень, при температуре 75°С $U_{действ}$ и $U_{имп}$ и вакуумная обработка образцов — как для электрокартона

Толщина образца в *мм*	2	3	4	5	6	7	8
$U_{действ}$ Цилиндр в *кв*	28,3	36,3	44,2	52,2	60,1	68,1	76
$U_{действ}$ трубка в *кв*	20,3	25,8	31,2	36,6	42,0	47,3	52,5
$U_{имп}$ Цилиндр в *кв*	80	102	125	148	170	193	215
$U_{имп}$ трубка в *кв*	55	72	88	106	120	135	150

При обработке образцов — сушка в воздухе без масла и испытании в воздухе при температуре 25°С

Толщина образца в *мм*	2	3	4	5	6	7	8
$U_{действ}$ трубка в *кв*	13,5	18	22	26	30	34	38

Справочные таблицы	Изоляционные материалы	*Приложение VII* лист 5

Кабельная бумага (К-12) и лакоткань (ЛХМ)

Пробивное напряжение при 50 *гц* и при импульсах для электродов по фиг. ПVII-2 и ПVII-3

$U_{действ}$ — минимальное действующее значение напряжения при 50 *гц* в *кв*; методика испытания — одноминутная ступенчатая, непрерывная.

$U_{имп}$ — амплитуда импульса в *кв* для волны 1,5/40 *мксек*; методика испытания — малоударная.

(—) — отрицательный импульс,

(+) — положительный импульс.

Обработка образцов — вакуумная сушка, пропитка маслом под вакуумом. В масле при $t = 75°$ С

Фиг. ПVII-2.

Фиг. ПVII-3.

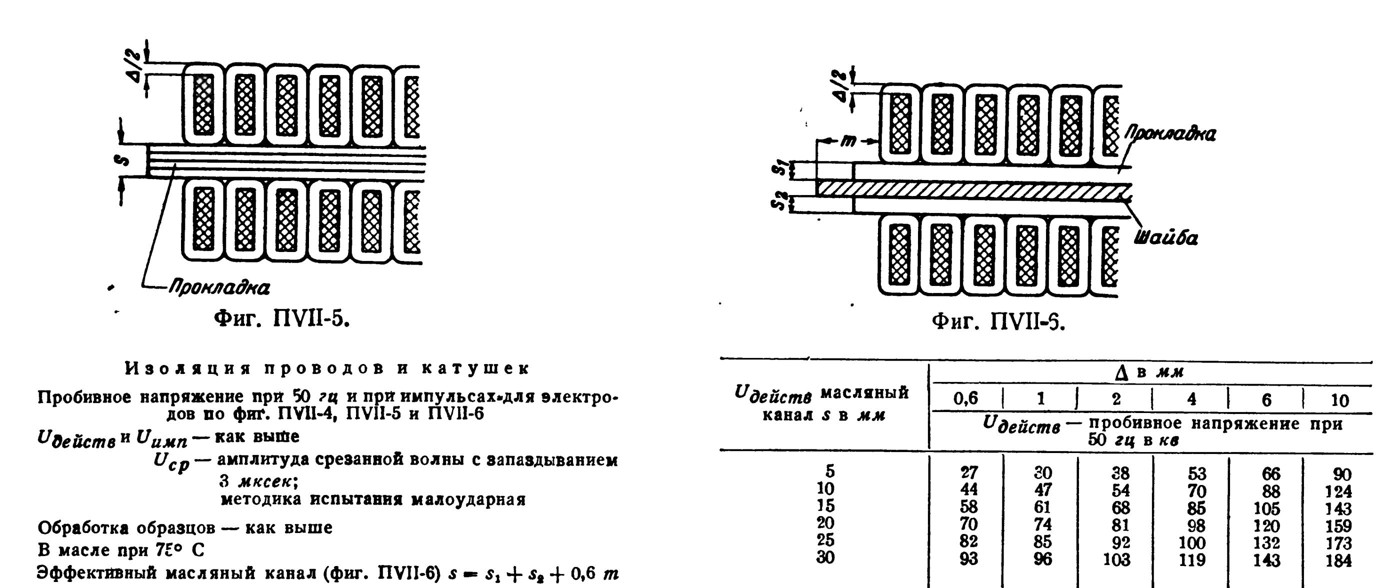
Фиг. ПVII-4.

Толщина *s* в *мм*	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20
$U_{действ}$ (К-12) в *кв*	8,5	17,2	25,8	33	48,5	61,5	73	83	101	119	133	147	161	174	186
$U_{действ}$ (ЛХМ) в *кв*	8,5	15,8	23,1	30,8	44	56	66	75	91	107	119	132	145	157	168
$U_{имп}$ (К-12) в *кв*	13	29	46	65	103	132	157	180	218	251	281	311	341	366	389
$U_{имп}$ (±) (ЛХМ) в *кв*	—	—	—	55	76	94	111	127	156	182	207	230	259	283	307

Обработка образцов — сушка в воздухе

В воздухе при $t = 25°$ С для электродов — 2 параллельных провода

Толщина *s* в *мм*	2	3	4	5	6	8	10
$U_{действ}$ (ЛХМ) в *кв*	23,5	32,5	39,5	46	53	64	73



Фиг. ПVII-5.

Фиг. ПVII-6.

Изоляция проводов и катушек

Пробивное напряжение при 50 *гц* и при импульсах для электродов по фиг. ПVII-4, ПVII-5 и ПVII-6

$U_{действ}$ и $U_{имп}$ — как выше

$U_{ср}$ — амплитуда срезанной волны с запаздыванием 3 *мксек*; методика испытания малоударная

Обработка образцов — как выше

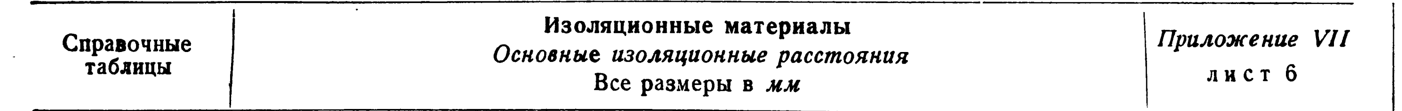
В масле при 7Е° С

Эффективный масляный канал (фиг. ПVII-6) $s = s_1 + s_2 + 0{,}6\ m$

$U_{действ}$ масляный канал *s* в *мм*	Δ в *мм*: 0,6	1	2	4	6	10
	$U_{действ}$ — пробивное напряжение при 50 *гц* в *кв*					
5	27	30	38	53	66	90
10	44	47	54	70	88	124
15	58	61	68	85	105	143
20	70	74	81	98	120	159
25	82	85	92	100	132	173
30	93	96	103	119	143	184

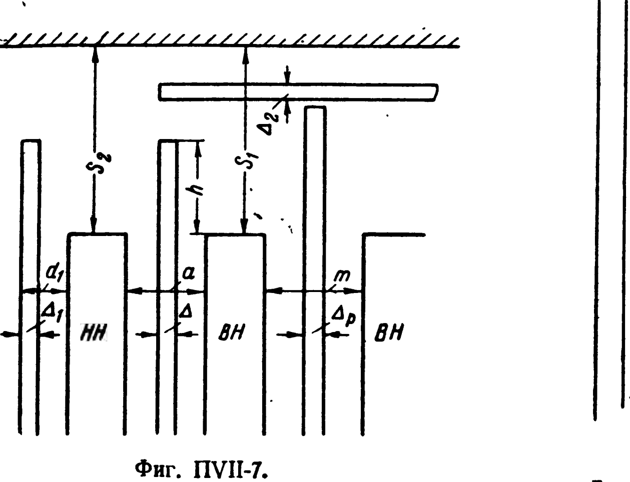
$U_{действ}$ масляный канал *s* в *мм*	Δ в *мм*: 0,6	1	2	4	6	10
	$U_{имп}$ — амплитуда пробивного напряжения в *кв* для полной волны					
5	90	100	122	167	220	332
10	141	154	167	208	270	380
15	180	192	205	244	305	410
20	219	230	244	276	333	435
25	252	265	274	302	358	452
30	277	284	296	323	375	474

$U_{действ}$ масляный канал *s* в *мм*	Δ в *мм*: 0,6	1	2	4	6	10
	$U_{ср}$ — амплитуда пробивного напряжения в *кв* для срезанной волны					
5	127	141	154	192	261	385
10	181	191	206	248	312	433
15	227	236	253	292	248	472
20	267	278	288	330	388	500
25	302	312	329	347	418	530
30	340	350	360	400	450	552



Справочные таблицы	**Изоляционные материалы** *Основные изоляционные расстояния* Все размеры в *мм*	*Приложение VII* лист 6

Главная изоляция трансформаторов класса 3—35 *кв*



Фиг. ПVII-7.

Емкостное кольцо
Барьеры
Угловые шайбы
НН
Обм. ВН
Цилиндры
110
8
8
70
76
5
4
66
3
1
70
15
63
6
6
6
6
57

Фиг. ПVII-8.
Главная изоляция трансформаторов класса 110 *кв* (испытательное напряжение 230 *кв*)

Испытательное напряжение, *кв*	Класс изоляции обмотки	S_1	a	Δ	h	m	Δ_p	Δ_2	S_2
25	3 и 6 *кв*	20	8,5	2,5	10	10	2	—	12,5
35	10	30	12	3	16	14	2	—	30
45	15	40	15	3,5	22	17	2	—	40
55	20	50	18	4	30	20	3	2	50
85	35	75	27	5	55	30	3	2	75

S_1 — минимальное расстояние от обмотки ВН до ярма;
a — минимальное расстояние между обмотками ВН и НН;
Δ и h — толщина и выступ цилиндра;
Δ_p — толщина междуфазовой перегородки.
Размеры a_1 и Δ_1 берутся равными a и Δ,

Расстояние от сердечника до первого цилиндра толщиной Δ_1 изменяется в зависимости от диаметра стержня от 2,5 до 10 *мм*.

Пересчет испытательных напряжений

Если требуется сравнить условия испытания при другой длительности, отличной от 1 мин., то новое испытательное напряжение надо умножить на соответствующий коэффициент k, указанный ниже. Полученное произведение дает эквивалентное одноминутное испытательное напряжение

Длительность испытания	Секунды						Минуты					
	1	2	5	10	20	30	1	2	5	10	30	60
Коэффициент k	0,63	0,74	0,79	0,85	0,91	0,93	1	1,06	1,13	1,17	1,23	1,26

Справочные таблицы	**Напряжение рассеяния**	*Приложение VIII* лист 1

Основные формулы

Напряжение рассеяния u_p в процентах от номинального напряжения трансформатора подсчитывается по формуле

$$u_p = \frac{In \cdot d_{cp} \cdot c \cdot \rho_p}{798 \cdot \frac{U}{n} H_к}, \qquad (1)$$

где In — полная намагничивающая сила одной обмотки (фиг. ПVIII-1). Для симметричной чередующейся дисковой обмотки (фиг. ПVII-4) In — намагничивающая сила одной полугруппы;

d_{cp} — средний диаметр канала рассеяния в *см* — для концентрических обмоток (фиг. ПVIII-1). Для чередующихся дисковых обмоток d_{cp} — средний диаметр катушек;

c — приведенная ширина в *см* потока рассеяния, см. далее;

ρ_p — коэффициент Роговского;

$\frac{U}{n}$ — число вольт на виток;

$H_к$ — высота обмотки в *см*. Для фиг. ПVIII-4 $H_к$ — радиальный размер обмотки в *см*.

Для простого концентрического типа обмоток (фиг. ПVIII-1) или для одной полугруппы чередующихся дисковых обмоток (фиг. ПVIII-4); c — приведенная ширина потока рассеяния подсчитывается по формуле

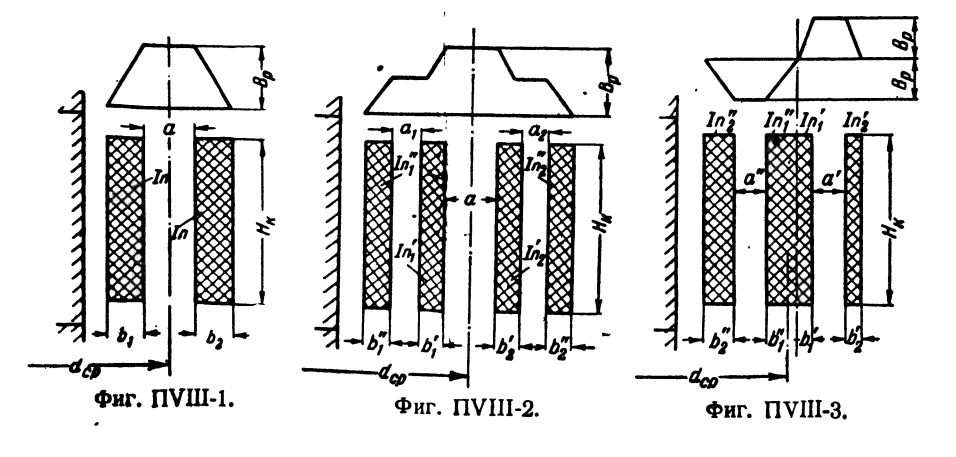
$$c = a + \frac{b_1 + b_2}{3}, \qquad (2)$$

Если одна из обмоток или обе подразделены на равные части (на фиг. ПVIII-2. на две части) промежуточными каналами, то c — подсчитывается по формуле

$$c = a + \frac{b_1' + b_1'' + b_2' + b_2''}{3} + a_1\left(\frac{In_1''}{In}\right)^2 + a_2\left(\frac{In_2''}{In}\right)^2. \qquad (3)$$

Здесь

$$In = In_1' + In_1'' = In_2' + In_2''.$$

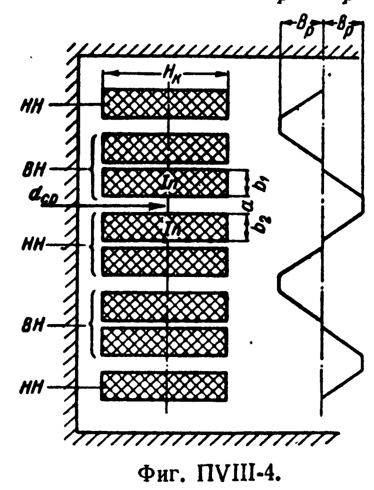


Фиг. ПVIII-1. Фиг. ПVIII-2. Фиг. ПVIII-3.

Справочные таблицы	**Напряжение рассеяния**	*Приложение VIII* лист 2

Эта формула показывает, что промежуточные каналы менее эффективны, чем главный канал a. Эта формула может быть распространена на любое число каналов, равномерно подразделяющих обмотку. Так же, как для случая подразделения обмотки одним каналом (a_1 или a_2 на фиг. ПVIII-2), при подразделении обмотки несколькими каналами эффективность ширины канала понижается пропорционально квадрату отношения ампервитков во внешней части обмотки (от данного канала до края обмотки) к полным ампервиткам во всей катушке.

Для двойной концентрической обмотки (фиг. ПVIII-3) подсчитываются напряжения рассеяния u_p' и u_p'' для каждого канала a' и a'' по формуле (1).



Фиг. ПVIII-4.

Здесь

$$\frac{b_1'}{b_1''}=\frac{In_1'}{In_1''}=\frac{In_2'}{I_{n2}''},$$

$$In_1'+In_1''=In=In_2'+In_2''.$$

Результирующее значение напряжения рассеяния u_p подсчитывается по формуле

$$u_p=\frac{u_p'In_1'+u_p''In_1''}{In}. \qquad (4)$$

Коэффициент Роговского ρ_p приближенно равен

$$\rho_p=1-\frac{a+b_1+b_2}{\pi H_к}=1-\frac{\lambda}{\pi H_к} \qquad (5)$$

или же берется по таблице в зависимости от отношения

$$\frac{H_к}{a+b_1+b_2}=\frac{H_к}{\lambda}, \text{ где } \lambda=a+b_1+b_2 \qquad (5а)$$

$\frac{H_к}{\lambda}$	30	20	10	8,0	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0
ρ_p	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,89

$\frac{H_к}{\lambda}$	2,5	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6
ρ_p	0,87	0,84	0,82	0,8	0,77	0,74	0,69	0,64	0,55

Справочные таблицы	**Напряжение рассеяния**	*Приложение VIII* лист 3

Расчет добавочного напряжения рассеяния

При неравномерном распределении витков с током в одной обмотке по высоте стержня или по отношению к распределению на стержне витков другой обмотки индуцируется добавочное напряжение рассеяния, которое увеличивает основное напряжение рассеяния. Тогда полное напряжение рассеяния u_{pn} (в процентах) подсчитывается по формуле

$$u_{pn} = u_p \left(1 + \frac{\sigma}{100}\right). \qquad (6)$$

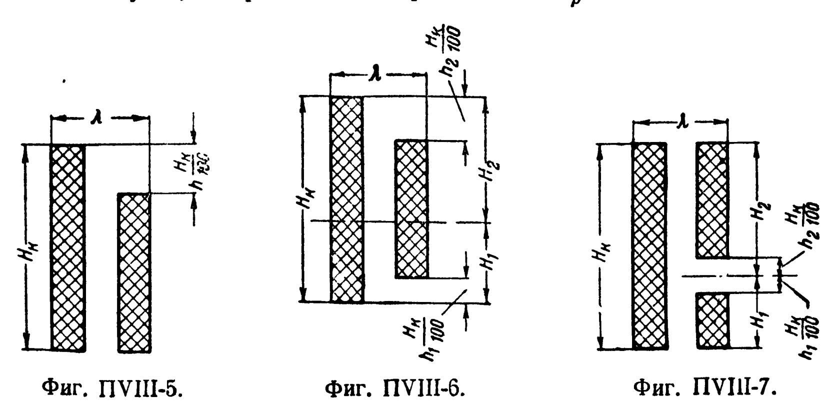
Здесь u_p — подсчитывается по вышеприведенным формулам (1) или (4) этого приложения.

Для случая, когда обмотка короче другой (фиг. ПVIII-5), укорочение на h в процентах $H_к$ — значение σ в процентах определяется по формуле

$$\sigma = \frac{h}{2}\left(1 + k_p \frac{\pi H_к}{\lambda} \cdot \frac{h}{100}\right). \qquad (7)$$

Размеры $H_к^c$ и λ — см. фиг. ПVIII-5.

Для случая, изображенного на фиг. ПVIII-5, $k_p = 1$.



Фиг. ПVIII-5. Фиг. ПVIII-6. Фиг. ПVIII-7.

Для случаев, изображенных на фиг. ПVIII-6 (укорочение с двух сторон) и на фиг. ПVIII-7 (разрыв в середине), k_p равно:

$$k_p = \frac{1 + \xi^2}{(1 + \xi)^2}, \qquad (8)$$

где

$$\xi = \frac{H_2}{H_1} \gtrless 1, \qquad (9)$$

а в формуле (7)

$$h = h_1 + h_2. \qquad (10)$$

Если $\xi = 1$, то $k_p = 0{,}5$; если $\xi = 1/3$, то $k_p = 0{,}625$.

Справочные таблицы	**Напряжение рассеяния**	*Приложение VIII* лист 4

Для упрощения вычислений по формуле (7) ниже даются значения σ в % для $k_p = 1$ и $k_p = 0,5$.

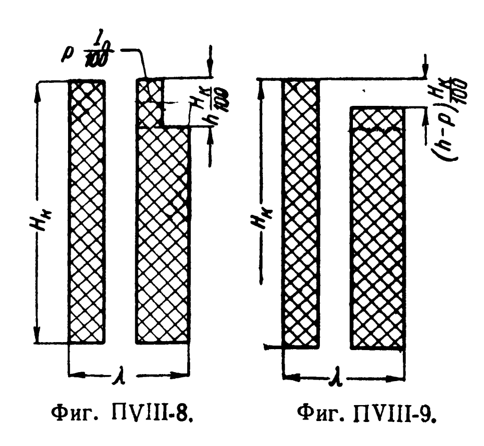
$k_p = 1$

$H_к$ / λ	σ в % для разных значений (h — p) %									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	3	4,5	6,5	8,5	11	14	17	21	25	29
12	3	5	7	10	13	16	20	24	28	33
14	3,5	5,5	8	11	14	18	22	27	32	
16	4	6	9	12	16	20	25	30		
18	4	6,5	9,5	13	17	22	27	33		
20	4,5	7	10	14	19	24	30			
22	4,5	7,5	11	15	20	26	32			
24	5	8	12	17	22	28	35			
26	5	8,5	13	18	24	30				
28	5,5	9	13	19	25	32				
30	6	9,5	14	20	27	34				
32	6	10	15	21	28	36				
34	6,5	11	16	22	30	38				
36	6,5	11	17	23	31					
38	7	12	18	24	33					
40	7,5	12	18	26						
45	7,8	14	20	29						
50	8,5	15	22	32						

$k_p = 0,5$

$H_к$ / λ	σ в % для разных значений (h — p) %									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	2	3,5	4,5	6	7,5	9	11	13	15	17
12	2,5	3,5	5	6,5	8	10	12	14	17	20
14	2,5	4	5,5	7	9	11	13	16	19	23
16	2,5	4	5,5	7,5	9,5	12	15	18	21	24
18	3	4,5	6	8	10	13	16	19	23	26
20	3	4,5	6,5	8,5	11	14	17	21	25	
22	3	5,0	7,0	9	12	15	19	22	26	
24	3	5,0	7,0	10	13	16	20	24	28	
26	3,5	5,5	7,5	10,5	14	17	21	25	30	
28	3,5	5,5	8	11	14	18	22	27	32	
30	3,5	5,5	8,5	11,5	15	19	24	29		
32	4	6,0	9	12	16	20	25	30		
34	4	6,5	9	13	17	21	26	32		
36	4	6,5	9,5	13,5	17	22	27	33		
38	4	7,0	10	14	18	23	29	35		
40	4,5	7,0	10	14,5	19	24	30			
45	4,5	7,5	11	16	21	26	33			
50	5	8,5	12	17	23	29	36			

Справочные таблицы	Напряжение рассеяния	Приложение VIII лист 5



Фиг. ПVIII-8. Фиг. ПVIII-9.

В том случае, когда одна обмотка на высоте h имеет уменьшенное число p (в %) витков с током (фиг. ПVIII-8), то приближенно считают, что добавочное напряжение рассеяния можно рассчитывать по всем предыдущим формулам (6) — (10), как если бы обмотка имела бы укорочение или разрыв по величине $(h-p)$ (фиг. ПVIII-9). В этих случаях в формулах (7) и (10) вместо h надо подставить разность $h-p$.

Трехобмоточные трансформаторы

Эквивалентная схема трехобмоточного трансформатора представлена на фиг. ПVIII-10. Здесь R_1, R_2 и R_3 представляют собой активные сопротивления в *ом* обмоток *1*, *2* и *3*, а X_1, X_2 и X_3 — условные индуктивные сопротивления в *ом* этих обмоток, вычисляемые по формулам

$$X_1 = \frac{X_{12} + X_{13} - X_{23}}{2}, \quad X_2 = \frac{X_{12} + X_{23} - X_{13}}{2},$$

$$X_3 = \frac{X_{13} + X_{23} - X_{12}}{2}, \tag{11}$$

где X_{12}, X_{13} и X_{23} — индуктивные сопротивления обмоток *1* и *2*, *1* и *3*, *2* и *3*. Индуктивные сопротивления любой пары обмоток подсчитываются как для двухобмоточного трансформатора, считая, что третья обмотка разомкнута — см. формулы (5-6) и (5-7). Однако, обычно вместо X_1, X_2 и X_3 пользуются напряжениями рассеяния u_{p1}, u_{p2} и u_{p3}, определяемыми по формулам

$$u_{p1} = \frac{u_{p12} + u_{p13} - u_{p23}}{2}, \quad u_{p2} = \frac{u_{p12} + u_{p23} - u_{p13}}{2}.$$

$$u_{p3} = \frac{u_{p13} + u_{p23} - u_{p12}}{2}, \tag{12}$$

R_1 X_1 R_2 X_2 N R_3 X_3

Фиг. ПVIII-10.

Справочные таблицы	Напряжение рассеяния	*Приложение VIII* лист 6

где u_{p12}, u_{p13} и u_{p23} — напряжения рассеяния обмоток *1* и *2*, *1* и *3*, *2* и *3*, которые подсчитываются как для двухобмоточного трансформатора, — см. формулы (1), (4) и (6) данного приложения VIII. В формулу (12) необходимо подставлять значения u_{p12}, u_{p13} и u_{p23}, рассчитанные для одинаковой мощности для всех пар обмоток. Обычно эти напряжения рассеяния приводят к мощности наиболее мощной обмотки.

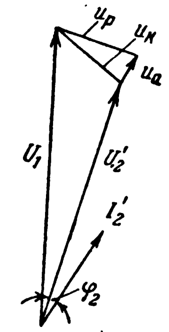
Напряжения короткого замыкания

Для двухобмоточных трансформаторов напряжения короткого замыкания в % подсчитываются по формуле

$$u_к = \sqrt{u_a^2 + u_p^2}\,, \tag{13}$$

где u_a — активное падение напряжения в %;

u_p — напряжение рассеяния в %.



Фиг. ПVIII-11.

Для трехобмоточного трансформатора напряжение короткого замыкания подсчитывается для каждой пары обмоток по формулам

$$u_{к12} = \sqrt{u_{a12}^2 + u_{p12}^2} \quad u_{к13} = \sqrt{u_{a13}^2 + u_{p13}^2}\,, \tag{14}$$

$$u_{к23} = \sqrt{u_{a23}^2 + u_{p23}^2}\,,$$

где u_{a12}, u_{a13}, u_{a23} — активные падения напряжения в процентах обмоток *1* и *2*, *1* и *3*, *2* и *3*, приведенные к одинаковой мощности;

u_{p12}, u_{p13}, u_{p23} — напряжения рассеяния в % для тех же пар обмоток, и приведенные к той же одинаковой мощности.

Падение напряжения

Для двухобмоточных трансформаторов падение напряжения Δu при заданной нагрузке и коэффициенте мощности $\cos\varphi_2$ (фиг. ПVIII-11) приближенно определяется по формуле

$$\Delta u = u_a \cos\varphi_2 + u_p \sin\varphi_2 + \frac{(u_p \cos\varphi_2 - u_a \sin\varphi_2)^2}{200}\,, \tag{15}$$

где u_a — активное падение напряжения и

u_p — напряжение рассеяния, выраженное в % при заданной нагрузке.

Для трехобмоточных трансформаторов применяется та же формула (15) для подсчета падения напряжения в каждой обмотке до точки *N* эквивалентной схемы (фиг. ПVIII-10), но подставляются вместо u_a и u_p значения u_{a1}, u_{p1}, u_{a2}, u_{p2} и т. д., приведенные к нагрузке данной обмотки, а вместо $\cos\varphi_2$ — коэффициент мощности для данной обмотки.

Справочные таблицы	**Добавочные потери в проводах катушек**	*Приложение IX* лист 1

Добавочные потери в проводах катушек рассчитываются в процентах от активных (омических) потерь $P_м$. Если s — процентное увеличение активных потерь, то полные активные потери $P_{мп}$ будут равны

$$P_{мп} = P_м \left(1 + \frac{s}{100}\right). \quad (1)$$

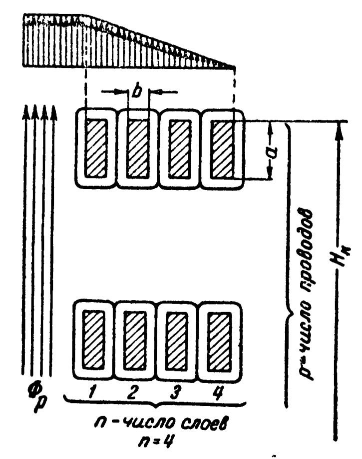
Значение s берется по кривым листа 3 и 4 в зависимости от β — приведенного размера провода и n — числа слоев проводов. Значения β и n берутся в направлении, перпендикулярном потоку рассеяния Φ_p. Приведенный размер β вычисляется по формуле

$$\beta = \frac{b}{m}\sqrt{\frac{f}{50}\,\frac{Pa}{H_к}\,\rho_p}, \quad (2)$$

где

$$m = \frac{100}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho}{\mu}\cdot\frac{100}{f}}, \quad (3)$$

здесь ρ — удельное сопротивление медного провода, равное 0,0215 $ом\,\frac{мм^2}{м}$ при температуре 75°С;



Фиг. ПIX-1.

ρ_p — коэффициент, см. формулу (5) приложения VIII (лист 1);

μ — магнитная проницаемость $= 1$;

f — частота;

Для $f = 50$ *гц* и медных проводов при температуре 75°С

$$m = 1{,}03,$$

b — размер провода (без изоляции) в направлении, перпендикулярном потоку рассеяния в *см*; фиг. ПIX-1.

a — размер провода (без изоляции) в направлении, параллельном потоку рассеяния;

n — число слоев в катушке в направлении, перпендикулярном потоку рассеяния;

p — число проводов в слое (или катушек) в направлении, параллельном потоку рассеяния;

$H_к$ — размер катушки в направлении, параллельном потоку рассеяния для концентрических обмоток, — см. формулы (3-8), (3-13), (3-14) и (3-16), для чередующихся дисковых обмоток надо вместо $H_к$ подставлять радиальный размер катушек (3-12).

На листе 4 даны значения добавочных потерь s — средних для всех n слоев.

Справочные таблицы	**Добавочные потери в проводах катушек**	*Приложение IX* лист 2

На листе 5 даны значения s в первом слое, прилежащем к каналу рассеяния, при наличии в катушке n последовательно соединенных слоев.

Для цилиндрических катушек n соответствует числу слоев в катушке.

Для непрерывных катушек n соответствует числу витков в одинарной катушке, если нет параллельных проводов. Так как при переходах из одной катушки в другую происходит полная транспозиция проводов, то при k — числе параллельных проводов в катушке с n_1 числом витков, добавочные потери следует считать для числа слоев

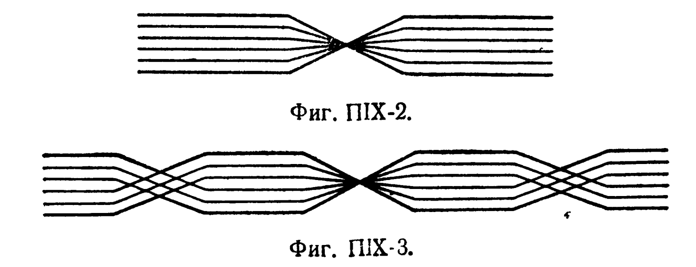
$$n = n_1 \cdot k.$$

Для спиральных катушек без транспозиции приведенный размер провода β равен суммарному размеру всех k параллельных проводов в направлении, перпендикулярном потоку рассеяния

$$\beta = k\frac{b}{m}\sqrt{\frac{f}{50}\cdot\frac{pa}{H_к}\cdot\rho_p}. \tag{2a}$$

Число же слоев берется равным единице. Обычно в этих случаях получаются недопустимо большие значения добавочных потерь.

Для уменьшения добавочных потерь в спиральных катушках перекрещивают провода (делаются транспозиции).



Фиг. ПIX-2.

Фиг. ПIX-3.

При одной средней транспозиции фиг. ПIX-2 приведенный размер провода следует определять по формуле

$$\beta = \frac{b}{m}\sqrt{\frac{f}{50}\cdot\frac{pa}{H_к}\,\rho_p\left(\frac{k^2}{4}-1\right)}, \tag{2b}$$

и считать $n = 1$. Здесь k — число параллельных проводов. При наличии средней транспозиции (фиг. ПIX-3) и двух транспозиций половинным числом проводов приведенный размер провода следует определять по формуле

$$\beta = \frac{b}{m}\sqrt{\frac{f}{50}\cdot\frac{pa}{H_к}\,\rho_p\left(\frac{k^2}{16}-1\right)}, \tag{2c}$$

и считать $n = 1$. Здесь k — попрежнему число параллельных проводов.

Справочные таблицы	**Добавочные потери в проводах катушек**	*Приложение IX* лист 3

Для двухходовых спиральных катушек число слоев n равно числу параллельных проводов в однофазной катушке при условии получения полной транспозиции всех параллельных проводов.

Приведенные на листах 3 и 4 кривые для s в функции от β вычислены по следующим формулам.

Средние значения s добавочных потерь для n слоев

$$\frac{s}{100}=\beta\,\frac{\operatorname{sh}2\beta+\sin 2\beta}{\operatorname{ch}2\beta-\cos 2\beta}+\frac{2}{3}(n^2-1)\,\beta\,\frac{\operatorname{sh}\beta-\sin\beta}{\operatorname{ch}\beta+\cos\beta}-1. \quad (4)$$

Наибольшие добавочные потери $s_{макс}$ будут в первом слое, прилежащем к каналу рассеяния, при наличии n слоев:

$$\frac{s_{макс}}{100}=\beta\,\frac{\operatorname{sh}2\beta+\sin 2\beta}{\operatorname{ch}2\beta-\cos 2\beta}+2(n^2-n)\,\beta\,\frac{\operatorname{sh}\beta-\sin\beta}{\operatorname{ch}\beta+\cos\beta}-1. \quad (5)$$

Разложение этих функций в ряд позволяет найти приближенные формулы для среднего значения добавочных потерь

$$\frac{s}{100}=\frac{n^2-0{,}2}{9}\,\beta^4 \quad (6)$$

и для наибольших добавочных потерь

$$\frac{s_{макс}}{100}=\frac{n^2-n+0{,}27}{3}\,\beta^4. \quad (7)$$

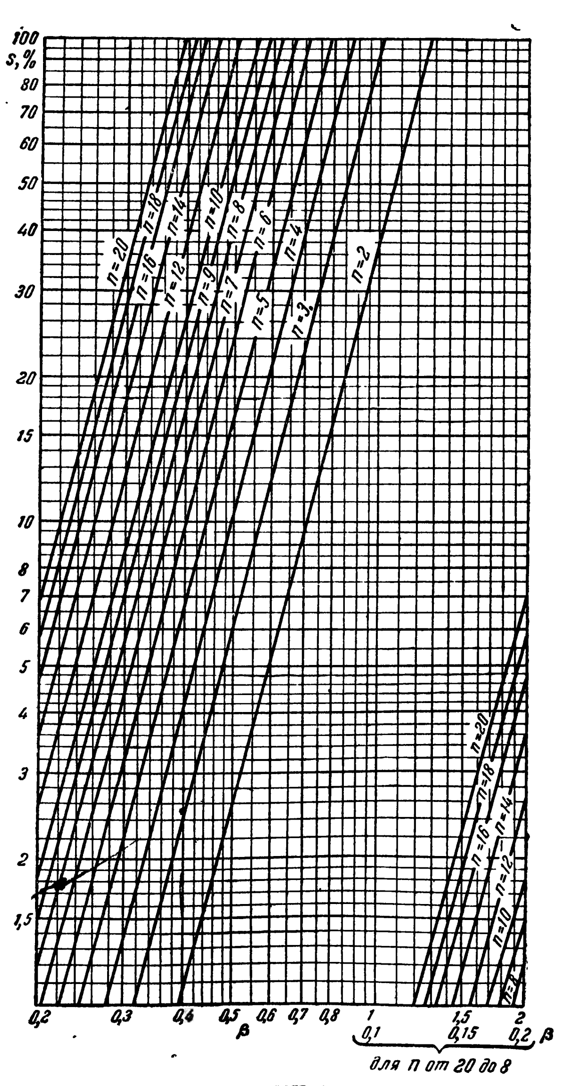
Эти формулы позволяют также оценить приближенно изменения процентного увеличения добавочных потерь при той или иной температуре. При этом, если весь расчет добавочных потерь ведется в ваттах, то с изменением температуры добавочные потери изменятся обратно пропорционально первой степени удельного сопротивления провода или обратно пропорционально второй степени удельного сопротивления провода, если расчет ведется в процентах.

Для приближенных расчетов, если известна индукция B_p потока рассеяния в гауссах, можно пользоваться формулой для добавочных потерь $p_д$ в ваттах на 1 *кг*

$$p_д=21{,}5\cdot b^2\left(\frac{B_p}{1\,000}\right)^2. \quad (8)$$

Справочные таблицы	**Добавочные потери в проводах катушек**	*Приложение IX* лист 4

Средние добавочные потери s в %.
β — приведенный размер провода в *см* [формула (2)],
n — число слоев.



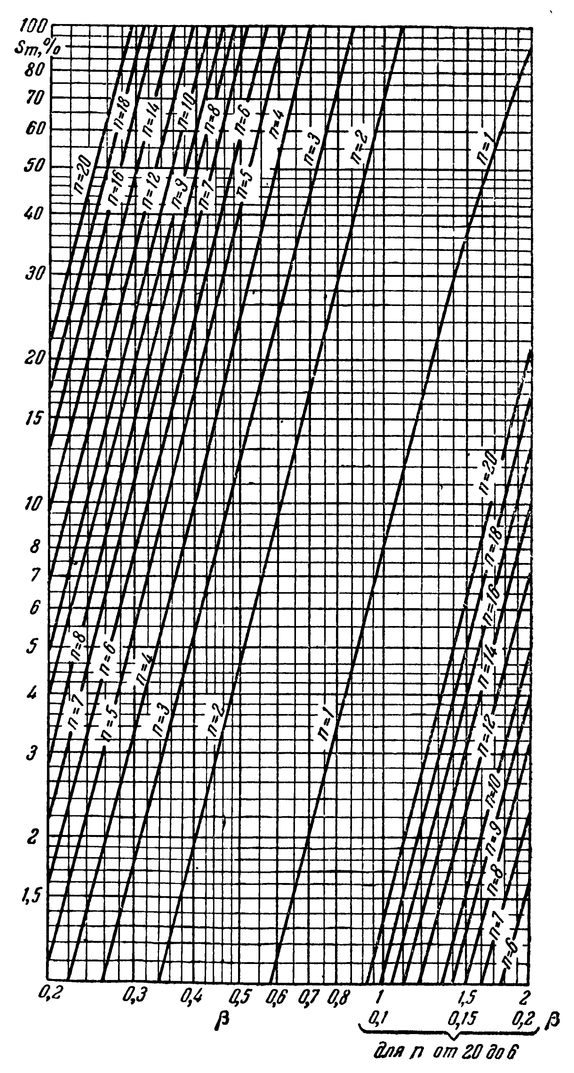
Фиг. ПIX-4.

Справочные таблицы	**Добавочные потери в проводах катушек**	*Приложение IX* лист 5

Добавочные потери s_m в % в слое, прилежащем к каналу рассеяния (максимальные добавочные потери), в многослойной катушке.

β — приведенный размер провода в *см* формула (2),

n — число слоев.



Фиг. ПIX-5.

Справочные таблицы	**Механические усилия**	*Приложение X* лист 1

Радиальные усилия

Для концентрических обмоток значение радиального усилия F_r в *кГ*, возникающее от взаимодействия токов обмоток высшего и низшего напряжения с потоком рассеяния, вычисляется по формуле

$$F_r = 6{,}4\,(In\sqrt{2})^2\,\frac{\pi D_{cp}}{H_\kappa}\,10^{-8}\,(\kappa\Gamma), \qquad (1)$$

где In — намагничивающая сила одной обмотки;

D_{cp} — средний диаметр по каналу рассеяния (фиг. ПХ-1) в *см*;

H_κ — высота обмотки в *см*.

Фиг. ПХ-1.

При коротком замыкании усилие F_r возрастает до значения F_{rk} из-за увеличения тока в $\left(\frac{100}{u_\kappa}\right)$ раз и из-за постоянной составляющей тока короткого замыкания, увеличивающей амплитуду тока короткого замыкания в k раз в начальный момент переходного режима. Поэтому F_{rk} радиальное усилие при коротком замыкании равно

$$F_{rk} = k^2\left(\frac{100}{u_\kappa}\right)^2 F_r\ (\kappa\Gamma). \qquad (2)$$

Здесь u_κ — напряжение короткого замыкания в %. Коэффициент k зависит от отношения реактивного сопротивления трансформатора к активному сопротивлению или, что то же, от отношения реактивного падения напряжения u_p к активному падению напряжения u_a. Значения для k и k^2 в функции от отношения u_p/u_a даны в нижеследующей таблице:

u_p/u_a	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	20
1	1	1,07	1,15	1,2	1,27	1,3	1,43	1,5	1,56	1,64	1,71	1,85
1	1	1,15	1,3	1,44	1,60	1,75	1,05	2,25	2,42	2,69	2,9	3,4

Справочные таблицы	**Механические усилия**	*Приложение X* лист 2

Осевые усилия

При несимметричном расположении витков с током в одной обмотке по отношению к расположению витков другой обмотки возникает осевое усилие $F_{ак}$, которое стремится еще больше увеличить эту несимметрию. Основное усилие $F_{ак}$ в *кГ* зависит от отношения $\frac{H_1}{c}$ (фиг. ПХ-2) и от $\frac{h}{100}$ — процента несимметрии.

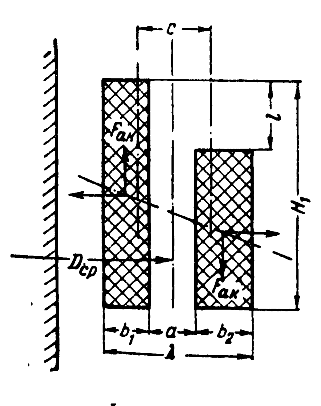
$$F_{ак} = k_a \frac{h}{100} F_{rк} \ кг, \tag{3}$$

где

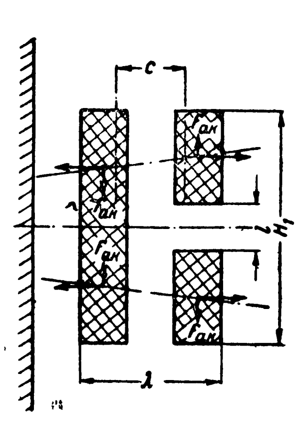
$$h = \frac{l}{H_1} \cdot 100, \tag{4}$$

здесь l — длина одностороннего ускорения обмотки (фиг. ПХ-2) в *см*; $F_{rк}$ — радиальное усилие формулы (1) при коротком замыкании. Значение k_a берется по кривым фиг. ПХ-4а в функции от h и от $\frac{H_1}{c}$.

При отсутствии витков в середине высоты обмотки (фиг. ПХ-3) на длине l *мм* осевые усилия $F_{ак}$ обычно считают равными половине того значения, которое получается по формуле (3) для тех же значений l и H_1 и того же отношения $\frac{H_1}{c}$, что и по фиг. ПХ-2.



Фиг. ПХ-2.

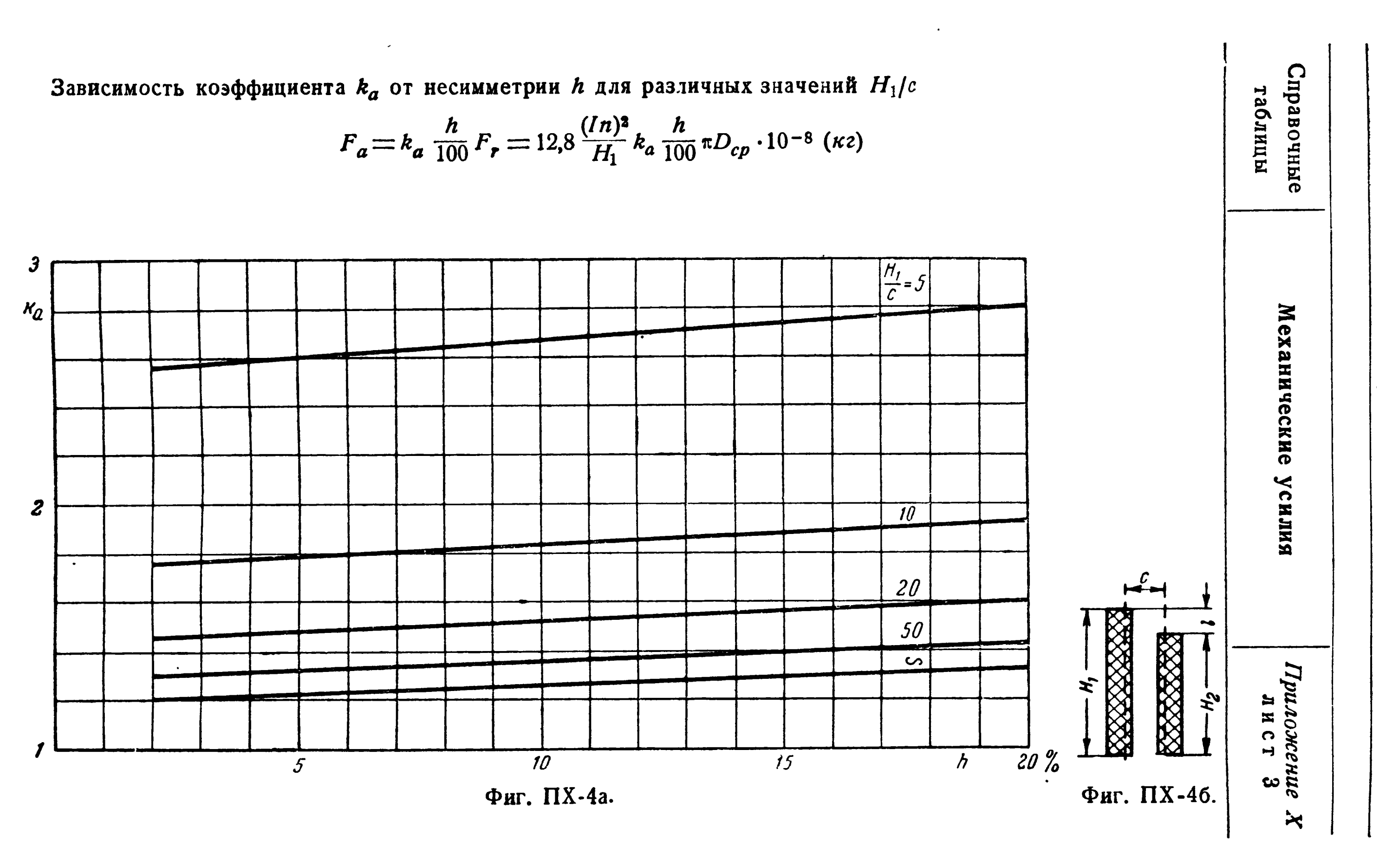


Фиг. ПХ-3.

Справочные таблицы	Механические усилия	*Приложение X* лист 3

Зависимость коэффициента k_a от несимметрии h для различных значений H_1/c

$$F_a = k_a \frac{h}{100} F_r = 12{,}8 \frac{(In)^2}{H_1} k_a \frac{h}{100} \pi D_{cp} \cdot 10^{-8} \ (кг)$$



Фиг. ПХ-4а.

Фиг. ПХ-4б.

Справочные таблицы	**Механические усилия**	*Приложение X* лист 4

Усилия в трехобмоточных трансформаторах

Для расчета механических усилий в трехобмоточном трансформаторе необходимо первоначально подсчитать осевые усилия (см. лист 1 и 2) F_{a12}, F_{a13}, F_{a23} для каждой пары обмоток *1-2*, *1-3*, *2-3*, как для двухобмоточного трансформатора.

В случае короткого замыкания трехобмоточного трансформатора на каждую обмотку будут действовать следующие усилия:

На обмотку *1* $$F_1 = \pm F_{12}\frac{k_1k_2}{(k_{12})^2}\cdot\xi_{12} \pm F_{13}\frac{k_1k_3}{(k_{13})^2}\cdot\xi_{13}.$$

На обмотку *2* $$F_2 = \pm F_{12}\frac{k_1k_2}{(k_{12})^2}\xi_{12} \pm F_{23}\frac{k_2k_3}{(k_{23})^2}\xi_{23}.$$

На обмотку *3* $$F_3 = \pm F_{13}\frac{k_1k_3}{(k_{13})^2}\xi_{13} \pm F_{23}\frac{k_2k_3}{(k_{23})^2}\xi_{23}.$$

Знаки плюс или минус выбираются в зависимости от направления токов и в зависимости от смещения одной обмотки по отношению к другой (см. фиг. ПХ-2 и ПХ-3 на листе 2).

Коэффициенты k с разными индексами суть кратности токов короткого замыкания по отношению к условному току I_k, подсчитываемому из условия одинаковой мощности каждой обмотки, равной обычно мощности наиболее мощной обмотки, аналогично тому, как это было принято при расчете напряжения рассеяния трехобмоточного трансформатора (см. приложение VIII, лист 2).

Тогда коэффициенты k_{12}, k_{13} и k_{23} суть кратности токов короткого замыкания в обмотках *1-2*, *1-3* и *2-3* по отношению к условному току $I_к$ в случае работы этих обмоток, как обмотки двухобмоточного трансформатора, т. е.

$$k_{12} = \frac{100}{u_{к12}};\ k_{13} = \frac{100}{u_{к13}};\ k = \frac{100}{u_{к23}},$$

где $u_{к12}$, $u_{к13}$, $u_{к23}$ — напряжения короткого замыкания в % для трех пар обмоток *1-2*, *1-3* и *2-3*, отнесенные к мощности наиболее мощной обмотки.

Коэффициенты k_1, k_2 и k_3 суть кратности токов короткого замыкания по отношению к условному току $I_н$ в обмотках *1*, *2* и *3* в случае работы этой обмотки, как одной из обмоток трехобмоточного трансформатора. Эти кратности k_1, k_2, k_3 зависят от распределения токов короткого замыкания при различных условиях короткого замыкания трехобмоточного трансформатора (см. ниже).

Коэффициенты ξ равны: $\xi_{12} = \frac{k}{k_{p12}}$; $\xi_{13} = \frac{k}{k_{p13}}$; $\xi_{23} - \frac{k}{k_{p23}}$,

где k — коэффициент, учитывающий возрастание амплитуд тока из-за постоянной составляющей тока короткого замыкания у трехобмоточного трансформатора см. формулу (2) на листе 1 приложения X. Коэффициенты же k_{p12}, k_{p13} и k_{p23} суть те же коэффициенты k по формуле (2), но при работе обмоток *1-2*, *1-3* и *2-3*; как у двухобмоточного трансформатора.

Справочные таблицы	**Механические усилия**	*Приложение X* лист 5

Для расчета коэффициентов k_1, k_2 и k_3 необходимо найти распределение токов короткого замыкания по обмоткам трехобмоточного трансформатора, пользуясь эквивалентной схемой фиг. ПХ-5.

Для этой схемы имеем

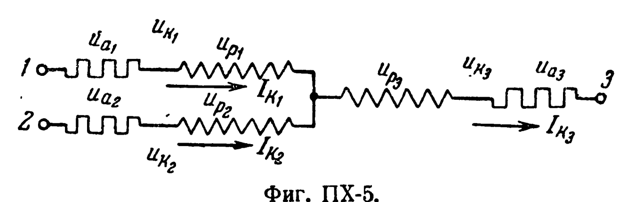
$$u_{p1}=\frac{u_{p12}+u_{p13}-u_{p23}}{2}; \quad u_{p2}=\frac{u_{p12}+u_{p23}-u_{p13}}{2};$$

$$u_{p3}=\frac{u_{p13}+u_{p23}-u_{p12}}{2},$$

и если все активные сопротивления обмоток *1*, *2* и *3* — u_{a1}, u_{a2} и u_{a3} малы по сравнению с u_{p1}, u_{p2} и u_{p3}, то можно считать

$$u_{к1}=\frac{u_{к12}+u_{к18}-u_{к23}}{2}; \quad u_{к2}=\frac{u_{к12}+u_{к23}-u_{к13}}{2}$$

$$u_{к3}=\frac{u_{к13}+u_{к23}-u_{к12}}{2}.$$



Фиг. ПХ-5.

Если теперь предположить, что обмотка *3* замкнута накоротко, а обмотки *1* и *2* питаются от двух генераторов, то результирующее активное падение напряжения u_{ap}, индуктивное падение напряжения u_{pp} и напряжение короткого замыкания $u_{кp}$ будут равны

$$u_{кp}=u_{к3}+\frac{u_{к1}\,u_{к2}}{u_{к1}+u_{к2}}=u_{к3}+\frac{u_{к1}\,u_{к2}}{u_{к12}},$$

$$u_{pp}=u_{p3}+\frac{u_{к1}^2\,u_{p2}+u_{к2}^2\,u_{p1}}{u_{a12}^2+u_{p12}^2},$$

$$u_{ap}=u_{a3}+\frac{u_{к1}^2\,u_{a2}+u_{к2}^2\,u_{a1}}{u_{a12}^2+u_{p12}^2},$$

здесь

$$u_{a12}=u_{a1}+u_{a2}.$$

Тогда коэффициент k в формуле (2) приложения X (лист 1) есть функция отношения u_{pp} и u_{ap}, т. е.

$$k=f\,(u_{pp}/u_{ap}).$$

Справочные таблицы	**Механические усилия**	*Приложение X* лист 6

Очевидно, что кратность тока короткого замыкания в обмотке *3* будет равна

$$k_3 = \frac{100}{u_{кр}} = \frac{I_{к3}}{I_{н'}}.$$

Очевидно, также, что

$$I_{к3} = I_{к1} + I_{к2}$$

или

$$I_н k_3 = I_н k_1 + I_н k_2, \text{ т. е. } k_3 = k_1 + k_2.$$

Кроме того,

$$I_{к1} u_{к1} = I_{к2} u_{к2}.$$

Поэтому

$$k_3 = k_1\left(1 + \frac{u_{к1}}{u_{к2}}\right)$$

и, следовательно,

$$k_1 = \frac{100}{u_{кр}} \cdot \frac{u_{к2}}{u_{к12}},$$

$$k_2 = \frac{100}{u_{кр}} \cdot \frac{u_{к1}}{u_{к12}}.$$

Допускаемые напряжения

Допускаемое напряжение	Медь	Алюминий
При растяжении	1 100 $кГ/см^2$	300 $кГ/см^2$
При изгибе	550 $кГ/см^2$	150 $кГ/см^2$
Предел прочности на растяжение	2 200 $кГ/см^2$	800 $кГ/см^2$

Допускаемое напряжение на сжатие для изоляционных хлопчатобумажных материалов — 200 $кГ/см^2$.

Справочные таблицы	**Тепловой расчет**	*Приложение XI* лист 1

Наибольшие допускаемые температуры обмоток и сердечника трансформатора и превышения этих температур над температурой окружающей среды

	Наибольшие температуры в °С	Допустимые превышения температур в °С
Обмотки из проводов, изолированных волокнистыми веществами		
1. Для масляных трансформаторов	105	70
2. Для сухих трансформаторов	95	60
Стальной остов		
3. Для масляных трансформаторов	110	75
4. Для сухих трансформаторов	95	60
5. Масло в верхних слоях	95	60

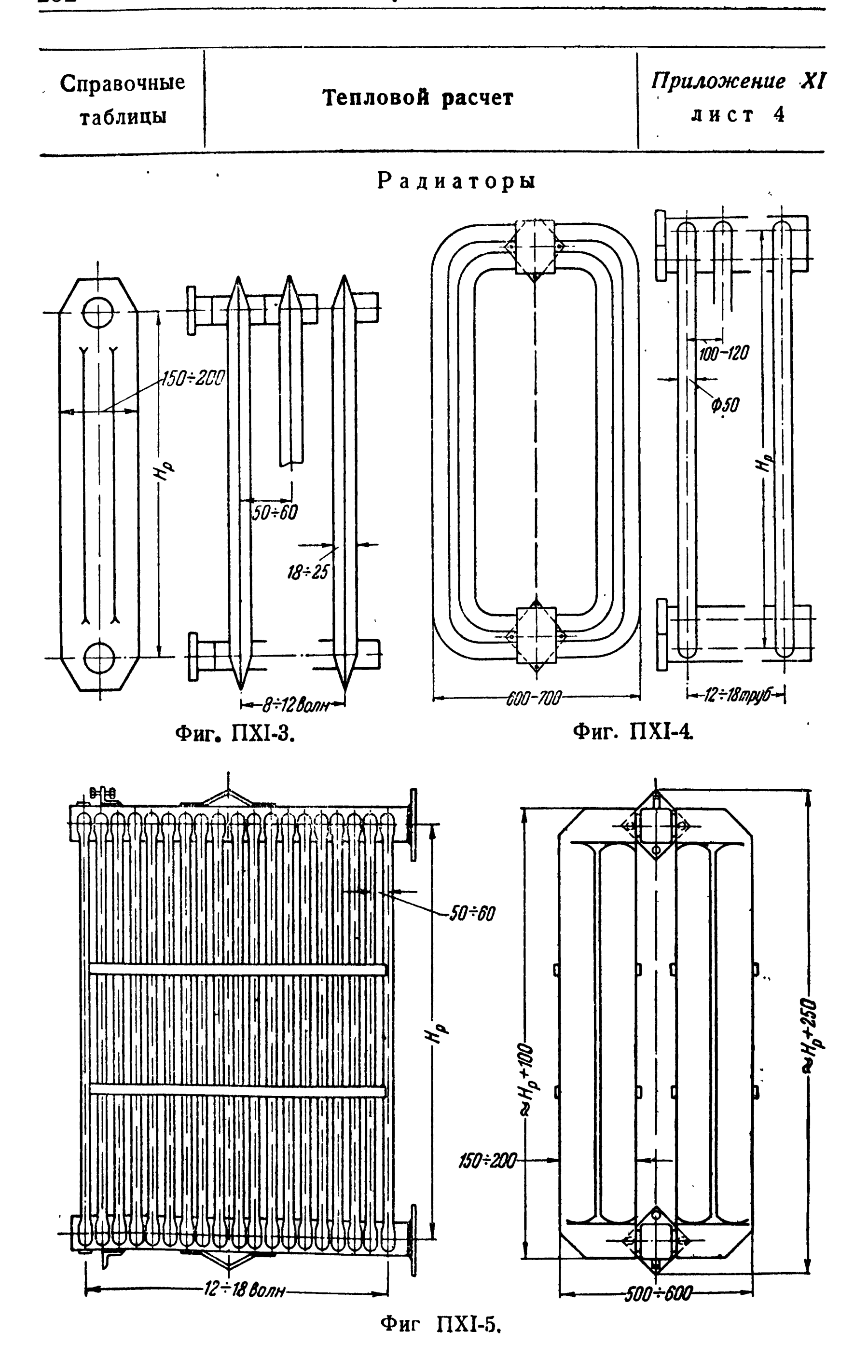
Примечание. Для обмоток из голых (не изолированных) проводов допускаются температуры и превышения температур на 5° С больше, чем в пунктах 1 и 2.

Средние превышения температур в °С обмоток над средней температурой масла при удельной тепловой нагрузке обмоток 1000 *вт/м²*.

1. Цилиндрические катушки из прямоугольных проводов (одно- и двухслойные)
   внутренние катушки 22
   наружные катушки 18
2. Слоевые катушки проводов круглого сечения (до 8—10 слоев) 22
3. Секционные катушки из проводов круглого сечения, намотанные на изоляционных цилиндрах 24
4. Горизонтальные дисковые катушки непрерывные и спиральные катушки
   внутренние катушки 25
   наружные катушки 23

Справочные таблицы	Тепловой расчет	*Приложение XI* лист 4

Радиаторы



Фиг. ПXI-3.

Фиг. ПXI-4.

Фиг ПXI-5.

Справочные таблицы	Тепловой расчет	*Приложение XI* лист 5

Расстояние H_p между осями	$q_б$ для волнистых радиаторов (фиг. ПXI-3, ПXI-5)	Для трубчатых радиаторов (фиг. ПXI-4)
$H_p = 1\,800$ *мм*	$8 \frac{вт}{м^2\,°C}$	$10 \frac{вт}{м^2\,°C}$
$H_p = 3\,000$ *мм*	$7 \frac{вт}{м^2\,°C}$	$8{,}5 \frac{вт}{м^2\,°C}$

При этом для поверхности гладкого бака берутся те же значения удельных тепловых нагрузок.

1. При обдувке радиаторов (дутьевое охлаждение) при помощи вентиляторов удельная тепловая нагрузка бака $q_б$ может быть повышена в 1,5 — 1,6 раза. Так, для волнистых радиаторов $q_б$ повышается до 13—11,0 $\frac{вт}{м^2\,°C}$, а для трубчатых радиаторов до 18 — 15 $\frac{вт}{м^2\,°C}$.

Ввиду усиленной теплоотдачи от поверхности бака при дутье усиливается и циркуляция масла. Поэтому можно считать, что при дутье средние превышения температур обмоток при 1 000 *вт* на 1 *м*² будут равны 0,8 — 0,85 от значений, указанных в разделе II.

2. Превышение температуры $\vartheta_{макс}$ в верхних слоях масла считается равным

$$\vartheta_{макс} = 1{,}2\ \vartheta_{ср}.$$

К этому значению $\vartheta_{макс}$ обычно еще добавляется поправка $\Delta\vartheta = 3 \div 5°$ C, учитывающая то, что остов трансформатора и обмотка, где выделяется тепло, по высоте немного меньше, чем высота бака, что ухудшает условия естественной конвекции масла в баке.

Для средних превышений температур, отличающихся от 50° C или для удельных тепловых нагрузок, отличающихся от значений, указанных в предыдущих параграфах, можно пользоваться таблицей приложения XI (лист 2).

Справочные таблицы	Тепловой расчет	*Приложение XI* лист 6

Физические постоянные некоторых материалов

	Удельный вес *кг/дм*³	Удельное сопротивление при 20°С, *ом/см*	Температурный коэффициент α 1/°С	Теплопроводность при 20°С, *вт/см* °С	Теплоемкость $\frac{вт/сек}{кг\ °С}$
1. Алюминий	2,64÷2,7	$0{,}03\cdot10^{-4}$	0,0039	2,02	880
2. Железо	7,8	$(0{,}11\div0{,}3)\cdot10^{-4}$	0,0045	0,65	480
3. Латунь	8,1÷8,7	$(0{,}07\div0{,}08)\cdot10^{-4}$	0,0015	0,6÷1,2	380÷360
4. Медь	8,9	$0{,}0175\cdot10^{-4}$	0,00395	3,6	385
5. Серебро	10,5	$0{,}0165\cdot10^{-4}$	0,0036	4,17	230
6. Цинк	7,1	$0{,}06\cdot10^{-4}$	0,0039	1,1	390
7. Трансформаторная сталь Э4А	7,55	$0{,}65\cdot10^{-4}$	—	0,4	—
8. Трансформаторное масло	0,89	—	—	0,000165	1850
9. Кабельная бумага, пропитанная маслом	0,78	—	—	0,00175	2000
10. Электрокартон	1,2	—	—	0,0016	1700
11. Лакоткань	1,15	—	—	0,0025	1300
12. Дерево (бук)	0,9	—	—	Вдоль 0,004 Поперек 0,002	2750
13. Воздух (20°С)	0,00121	—	—	0,00022	—
14. Вода	1,0	—	—	0,006	4,19

Переводные коэффициенты физических величин

1 *ккал* = 4 184 *вт сек* = 1,1628 *вт час*,

$$1\ \frac{ккал}{час} = 1{,}1628\ вт = 0{,}001582\ л.\,с.;\ 1\ л.\,с. = 632\ \frac{ккал}{час},$$

1 *вт сек* = 0,000239 *ккал* = 0,239 *кал*,

1 *вт час* = 0,8514 *ккал* = 851,4 *кал*,

$$1\ \frac{ккал}{час\ м°С} = 1{,}1628\ \frac{вт}{м°С} = 0{,}001163\ \frac{вт}{см°С},$$

$$1\ \frac{кал}{см\ сек°С} = 4{,}184\ \frac{вт}{см°С},$$

1 = 10 *м* вод. ст = 735,53 *мм* рт. ст.

Для меди $1\ \frac{вт}{см^3} = 112\ \frac{вт}{кг}$,

для трансформаторной стали $1\ \frac{вт}{см^3} = 132\ \frac{вт}{кг}$.

Справочные таблицы	Схемы и группы соединений обмоток трансформаторов	*Приложение XII* лист 1

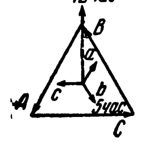
При составлении схем и векторных диаграмм приняты следующие условности:

1. Во всех схемах обмотки ВН и НН имеют одинаковое направление намотки, т. е. обе обмотки имеют одинаковое винтовое вращение, если смотреть на них с одной стороны, например сверху.

Для упрощения можно считать, что все обмотки — однослойные, цилиндрического типа.

2. Если требуется изобразить обмотки, имеющие разное направление намотки, то на схеме для этого показаны разные обходы обмоток, например в схеме 16 (лист 4 приложения XII) для обмотки ВН обход сверху вниз, а для обмотки НН — снизу вверх.

Для любой обмотки перемена местами для начал и концов обмоток равносильна изменению направления намотки на обратное.



Фиг. ПXII-1.

3. Все векторные диаграммы дают векторы напряжений на зажимах, как для первичной, так и для вторичной обмотки, т. е. векторы практически измеряемых напряжений.

4. Для сокращения числа вариантов схем всюду условно принято для определения группы (углового сдвига), что обмотка ВН является первичной обмоткой.

5. Векторы обмоток высшего и низшего напряжений соответствующих фаз изображаются параллельными прямыми. При этом последние имеют одинаковое направление, если обход обмоток высшего и низшего напряжений происходит в одном и том же направлении.

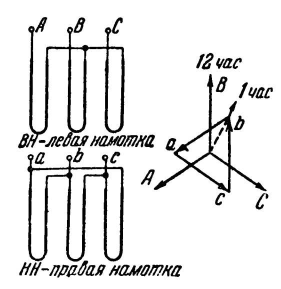
6. Способ построения векторных диаграмм следующий: совмещаются центры тяжести векторных диаграмм; вектор, проведенный из центра тяжести до конца вектора одной из фаз (например, *B*) высшего напряжения условно изображает минутную стрелку часов, стоящую на 12 час. (см. фиг. ПXII-1). Тогда конец одноименного вектора (т. е. *в*) низшего напряжения покажет, как часовая стрелка, число часов, равное 5.

Внешний вид практических соединений обмоток трансформаторов обычно отличается от внешнего вида схем соединений, показанных на листах 3, 4 и 5 приложения XII. На фиг. ПXII-2 показано, что обмотки ВН и НН выполнены в виде двухслойных цилиндрических катушек. Если обе обмотки одинаково намотаны, например обе левые, то группа соединений для фиг. ПXII-2 будет 1 час. Если обмотка ВН — правая, а НН — левая (фиг. ПXII-3а), то, не меняя картины соединения концов, получим группу 7. Та же группа 7 получится, если ВН—левая, а НН — правая катушки (фиг. ПXII-3б).

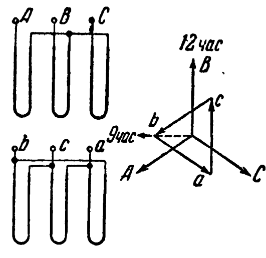
Если не изменять картины соединения концов и не изменять направления намотки, но изменить наименование концов, сохраняя их круговую последовательность, то получим группы, отличающиеся на 4 часа— группу 5 для последовательности „*c*, *a*, *b*" наименования концов НН (фиг. ПXII-4) и группу 9 часов для последовательности „*b*, *c*, *a*" (фиг. ПXII-5).

Если обмотки ВН и НН останутся левыми, но переменить в обмотке ВН местами начала и концы (фиг. ПXII-6), то получится 7 группа. Круговая подстановка букв на стороне НН даст группы 11 (фиг. ПXII-7) и 3 (фиг. ПXII-8).

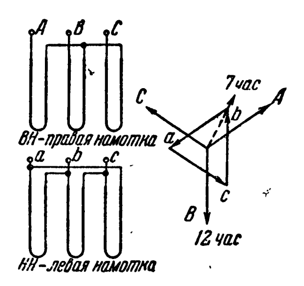
Справочные таблицы	**Схемы и группы соединения трансформаторов**	*Приложение XII* лист 2



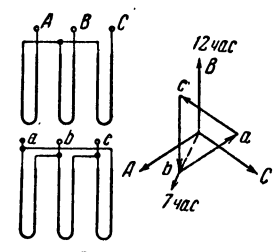
Фиг. ПXII-2.



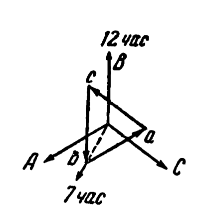
Фиг. ПXII-5.



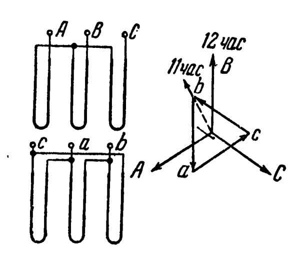
Фиг. ПXII-3а.



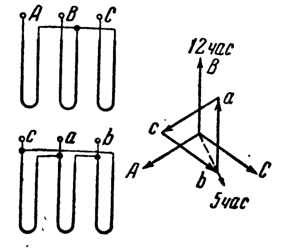
Фиг. ПXII-6.



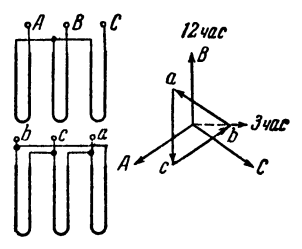
Фиг. ПXII-3б.



Фиг. ПXII-7.

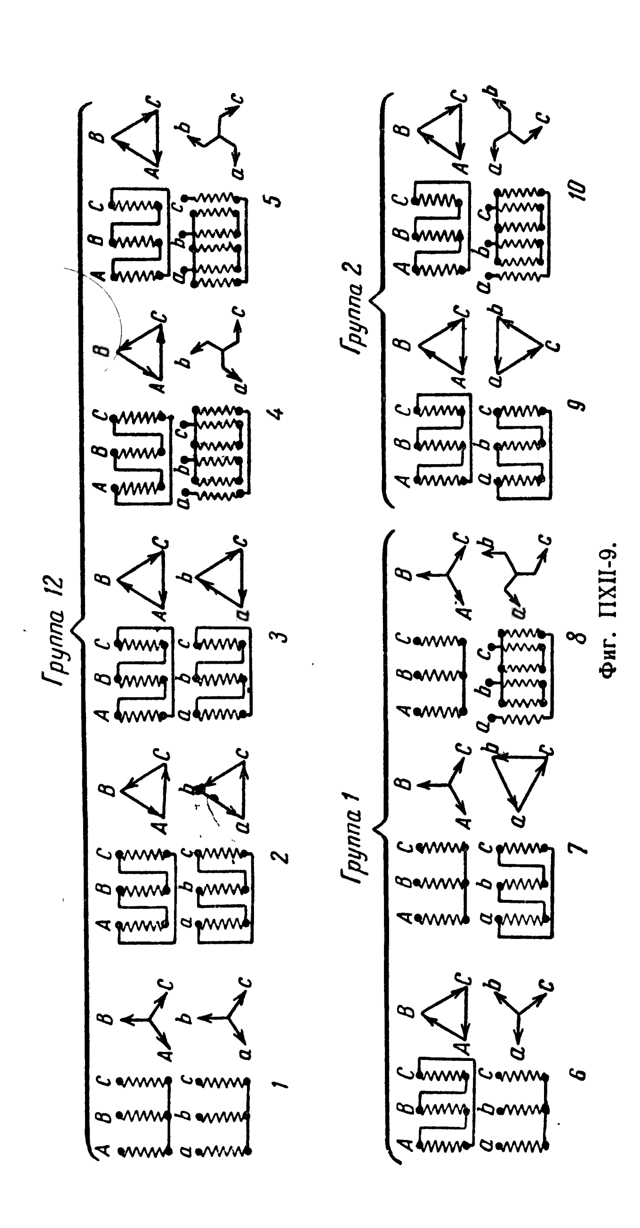


Фиг. ПXII-4.



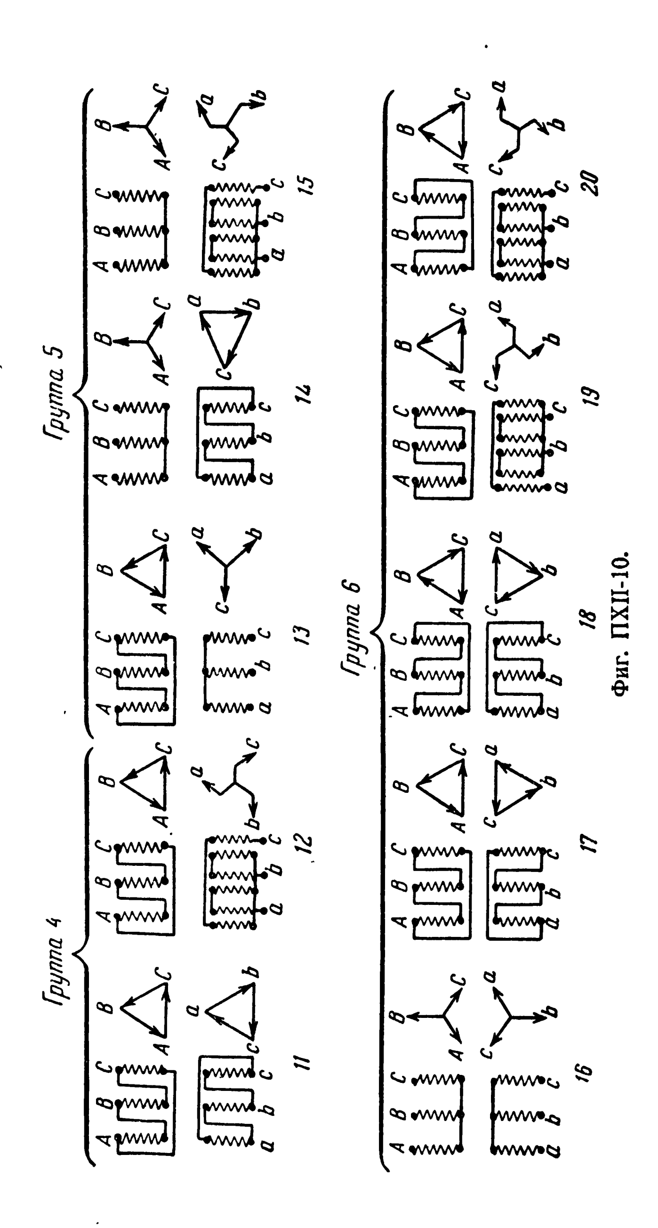
Фиг. ПXII-8.

Справочные таблицы	**Схемы и группы соединений обмоток трансформаторов**	*Приложение XII* лист 3



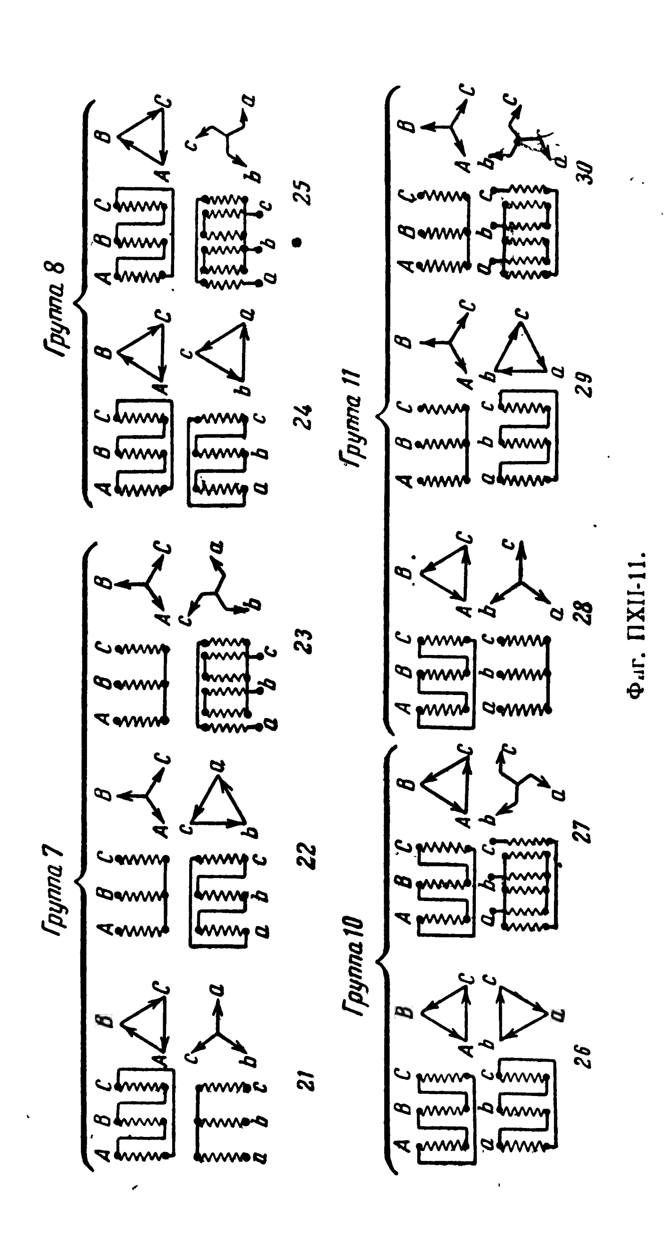
Фиг. ПХII-9.

Справочные таблицы	**Схемы и группы соединений обмоток трансформаторов**	*Приложение XII* лист 4



Фиг. ПХII-10.

Справочные таблицы	**Схемы и группы соединений обмоток трансформаторов**	*Приложение XII* лист 5



Фиг. ПXII-11.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Пиотровский, проф., Трансформаторы. КУБУЧ, Ленинград, 1934.
2. Г. Н. Петров, Трансформаторы. ОНТИ, Энергоиздат, 1934.
3. В. Н. Глазанов и Е. А. Иванов. Силовые трансформаторы высокого напряжения. Изд. АН СССР. Ленинград, 1934.
4. Н. И. Булгаков, Примеры расчетов трансформаторов. ОНТИ, 1935.
5. Л. М. Шницер, Трансформаторы. ГЭИ, 1944.
6. А. В. Трамбицкий, Расчет трансформаторов. ГОНТИ, 1938.
7. Г. Н. Петров, проф. и др., Электрические машины, ч. 1. Госэнергоиздат, 1940.
8. Л. М. Пиотровский, проф., Электрические машины. Госэнергоиздат, 1947.
9. М. Видмар. Трансформаторы. ГОНТИ, 1931.
10. А. В. Трамбицкий, Атлас конструкций трансформаторов. ОНТИ, 1936.
11. А. В. Корицкий, Конструирование трансформаторов. ОНТИ, 1936.
12. Э. А. Манькин, Советское трансформаторостроение—на уровень мировой техники. Электричество, № 3, 1941.
13. А. В. Сапожников, Силовые трансформаторы (учебные таблицы). Госэнергоиздат, 1947.
14. В. А. Алаев, Обмотки высоковольтных трансформаторов. ОНТИ, 1937.
15. А. И. Синица, Ремонт и восстановление трансформаторов. Госэнергоиздат, 1946.
16. И. Стекольников, Перенапряжения и борьба с ними. Энергоиздат, 1933.
17. П. П. Стендер, К теории трансформаторов Палуева. Журнал технической физики, т. III, № 2—3, 1933.
18. В. А. Карасев, Перенапряжения в трансформаторах с глухозаземленной нейтралью. Энергоиздат, 1934.
19. А. А. Смуров, проф., Электротехника высокого напряжения, т. II, часть 2. ОНТИ, 1935.
20. Г. Н. Петров, проф., К расчету перенапряжений в трансформаторах. Бюллетень ВЭИ, № 12, 1935.
21. В. А. Карасев, П. П. Чусов, С. А. Назаров, А. В. Панов, Л. А. Мравян, Вопросы трансформаторостроения (выпуск 31) в основном посвящен вопросам перенапряжений). ОНТИ, 1938.
22. А. Ф. Богомолов и Л. И. Иванов, Перенапряжения в трехфазных распределительных трансформаторах. Электрические станции, № 7, 1939.
23. Б. М. Баранов и С. А. Баженов, Защита распределительных трансформаторов от атмосферных перенапряжений со стороны низкого напряжения. Электрические станции, № 12, 1939.

24. В. А. Карасев, А. В. Панов, А. Г. Перлин, А. В. Сапожников, Е. С. Фрид, Импульсная прочность трансформаторов. Труды конференции по трансформаторостроению. Госэнергоиздат, 1940.

25. Л. И. Сиротинский, проф. и др., Техника высоких напряжений. Госэнергоиздат, 1940.

26. М. В. Липковский, к. т. н., Система нерезонирующих трансформаторов. Электричество, № 3, 1941.

27. В. А. Карасев, Теория электромагнитных процессов в обмотках. Госэнергоиздат, 1947.

28. Е. С. Фрид, Основные эмпирические закономерности импульсных градиентов в обмотках трансформаторов. Электричество, № 3, 1947.

29. Под ред. Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева, Справочник по электрической изоляции. Госэнергоиздат, 1948.

30. А. В. Панов, к. т..н, К вопросу координации изоляции высоковольтных трансформаторов. Госэнергоиздат, 1948.

31. Dreyfus, Напряженности электрического поля около острых углов. Arch. f. El, том XIII, стр. 125, 1924.

32. П. П. Чусов, Трехобмоточные трансформаторы. Изд. МВТУ, 1930.

33. Г. Н. Петров, проф., К расчету рассеяния трансформаторов. Электричество, № 15, 1935.

34. Э. А. Манькин, Расчет реактивности рассеяния трансформаторов с обмотками сложной конфигурации. Электричество, № 24, 1937.

35. В. А. Карасев, Вопросы трансформаторостроения, вып. № 31. Труды ВЭИ. Рассеяние в системах обмоток, включающих элементы прямоугольного сечения. ОНТИ, 1938.

36. Г. Н. Петров проф., К теории расчета индуктивности рассеяния трансформатора. Электричество, № 3, 1948.

37. В. С. Давыдов, К вопросу о механических усилиях в трансформаторе при коротком замыкании. Электричество, № 7—8, 1929.

38. В. Б. Романовский, Об электродинамическом взаимодействии между токоведущими системами. Вестник эл. техн., № 5—6, 1931.

39. А. А. Зингерман, К вопросу о механическом расчете шин. Электричество, № 14, 1932.

40. Ю. В. Буткевич, В. В. Михайлов, И. И. Ратгауз, Реакторы. Госэнергоиздат, 1933.

41. В. Б. Романовский, Теория колебаний шин и изоляторов под влиянием электродинамических усилий в сборнике Высоковольтное аппаратостроение. ОНТИ, 1935.

42. К. М. Петров, К вопросу о механическом расчете шин. Электричество, № 2, 1935.

43. В. Б. Романовский и Б. С. Солтамов, К вопросу о расчете пакета шин с точки зрения электродинамической устойчивости. Электричество, № 2, 1935.

44. Г. С. Аронзон, Электродинамические усилия в трансформаторах. Известия ОТН АН СССР, № 1, 1940.

45. И. В. Ананьев, Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем. Гостехиздат, 1946.

46. Н. Е. Лысов, Выбор однопроводниковых шин с точки зрения нагрева при нормальном режиме. Электричество, № 2, 1935.

47. П. М. Тихомиров, Исследование теплоотдачи в обмотках трансформаторов. Электричество, № 12, 1938.

48. Р. Л. Аронов, проф., Методы расчетов тепловых процессов в активных материалах электротехнических конструкций. ГОНТИ, Харьков, 1938.

49. Ю. В. Корицкий, Влияние перегрузок на срок службы бумажной изоляции трансформаторов. Электричество, № 12, 1938.

50. Л. М. Шницер, Перегрузка трансформаторов. Электричество, № 4, 1939.

51. Л. М. Шницер, Перегрузочная способность масляных трансформаторов. Труды конференции по трансформаторостроению. Госэнергоиздат, 1940.

52. Ю. В. Корицкий и А. В. Альтшуллер, Определение старения изоляции обмоток трансформаторов. Бюллетень ВЭИ, № 3, 1940.

53. Г. В. Алексенко, Параллельная работа трехфазных двухобмоточных трансформаторов. ОНТИ, 1934.

54. Г. В. Алексенко, Испытание высоковольтных и мощных трансформаторов. ОНТИ, 1936.

55. Н. И. Павлов, Испытание трансформаторов. ОНТИ, 1937.

56. Н. Ф. Байдак, Общее решение проблемы экономического трансформатора. Электричество, № 15, 1935.

57. В. А. Трапезников, проф., О приведенном весе и стоимости в электромашиностроении. Электричество, № 14, 1935.

58. Н. Ф. Байдак, Технико-экономический метод определения основных размеров трансформаторов. Электричество, № 3, 1935.

59. А. В. Трамбицкий, Расчет трансформаторов. Вестн. Т. и Э. Э., стр. 30, 1930.

60. А. В. Трамбицкий, К теории ряда трансформаторов возрастающей мощности и о практических отступлениях от этой теории. Электричество, стр. 785, 1927.

61. В. А. Трапезников, проф., Обобщенные условия соразмерности трансформаторов и электрических машин. Электричество, № 2, 1946.

ОПЕЧАТКИ

Стра-ница	Строка	Напечатано	Должно быть
33	7 сверху	$\sigma_{ф}$	$\sigma_{ст}$
75	9 снизу	из одинаковых катушек	из одинарных катушек
212	5 „	$U/n = 35$	$U/n = 3,5$
229	6 и 7 сверху	$1 - \pi \cdot 60,0 =$	$1 - \frac{7,5}{\pi \cdot 60} =$
235	6 и 7 сверху	57 275 $0,035 = \overline{\pi \cdot 630}$	57 27,5 $\overline{84,5}$
236	6 „	918 ± 2 (283)	218 ± 2 (23)
237	1 снизу	2,75	27,5
241	6 „	неуказанные каналы по 5 *мм*	неуказанные каналы по 5,5 *мм*
269	во всех 3-х табл.	$U_{действ}$ масляный канал	Эффективный масляный канал
280	4 сверху	в однофазной катушке	в одинарной катушке
283	1 и 2 снизу	1 | 1 | 1,07 | . . . 1 | 1 | 1,15 | . . .	k | 1 | 1,07 | . . . k^2 | 1 | 1,15 | . . .
290	6 сверху (2 раза)	$\frac{g}{1\,000}$	$\frac{q}{1\,000}$

Н. И. Булгаков „Расчет трансформаторов“